W1-01 : Histoire et introduction à l'énergie éolienne

Objectifs d'apprentissage

À la fin du module « Histoire de l'énergie éolienne et introduction à cette énergie », les apprenants seront capables de :

- décrire l'évolution historique de l'énergie éolienne, depuis les moulins à vent traditionnels jusqu'aux éoliennes modernes de grande puissance ;
- expliquer le vent en tant que ressource énergétique, notamment la manière dont les mouvements atmosphériques créent une énergie cinétique exploitable ;
- identifier les principales caractéristiques du vent, telles que sa vitesse, sa direction, sa variabilité et la masse volumique de l'air, et expliquer leur influence sur la production d'énergie ;
- distinguer les applications éoliennes terrestres et en mer et décrire leur rôle dans la production d'électricité ;
- analyser les tendances mondiales de l'énergie éolienne, notamment les principales régions de déploiement, l'évolution de la puissance installée et les perspectives de développement ;
- évaluer le rôle de l'énergie éolienne dans la transition vers une énergie propre, notamment ses avantages, ses limites, ses défis et les possibilités qu'elle offre pour des systèmes électriques durables.

Résumé : L'énergie éolienne est l'une des ressources énergétiques renouvelables les plus anciennes et les plus importantes utilisées par les sociétés humaines. Depuis les premiers moulins à vent servant à moudre les céréales et à pomper l'eau jusqu'aux grandes éoliennes actuelles raccordées aux réseaux électriques modernes, la technologie éolienne a évolué pour devenir une solution essentielle de production durable d'électricité. Ce cours d'introduction présente l'évolution historique de l'énergie éolienne et explique comment le vent est devenu un élément indispensable de la transition mondiale vers une énergie propre. Les apprenants découvrent la nature fondamentale du vent en tant que ressource énergétique, notamment sa vitesse, sa direction, sa variabilité et la masse volumique de l'air, ainsi que l'incidence de ces propriétés sur la production d'électricité. Le cours donne également une vue d'ensemble des systèmes éoliens modernes, notamment la différence entre les applications terrestres et en mer, ainsi que leur contribution aux systèmes électriques nationaux et régionaux. Il examine en outre les tendances mondiales de l'énergie éolienne, en mettant en évidence les pays chefs de file, la croissance de la puissance installée, les progrès technologiques et les possibilités futures. Une attention particulière est accordée à l'importance environnementale, technique et économique de l'énergie éolienne pour réduire les émissions de gaz à effet de serre, renforcer la sécurité énergétique et élargir l'accès à une électricité propre. Le cours aborde également les principaux défis, tels que l'intermittence, le choix des sites, l'intégration au réseau, les préoccupations environnementales et les considérations de coût. À la fin de la séance, les apprenants comprendront le contexte historique, les notions fondamentales, la situation actuelle et le potentiel futur de l'énergie éolienne en tant que solution énergétique propre, évolutive et durable, tant pour les systèmes électriques centralisés que décentralisés.

1 Développement historique de l'énergie éolienne

1.1 Pourquoi l'énergie éolienne?

L'énergie éolienne est passée de l'une des premières sources naturelles de force motrice employées par l'humanité à l'un des piliers majeurs de la transition moderne vers une énergie propre. Pendant des milliers d'années, les populations ont utilisé le vent pour faire avancer les bateaux, pomper l'eau et moudre les céréales, démontrant ainsi sa valeur bien avant le début de la production d'électricité (figure 1.1). Au fil du temps, les progrès technologiques ont transformé les simples moulins à vent en éoliennes perfectionnées capables de produire de grandes quantités d'électricité pour les ménages, les industries et les réseaux nationaux. Depuis les premières machines mues par le vent des civilisations anciennes jusqu'aux vastes parcs éoliens terrestres et en mer d'Europe, d'Amérique du Nord et d'autres régions, l'énergie éolienne est devenue de plus en plus efficace, fiable et déployable à grande échelle. Aujourd'hui, elle aide les pays à réduire leur dépendance à l'égard des combustibles fossiles, à diminuer leurs émissions de carbone, à renforcer leur sécurité énergétique et à élargir l'accès à l'électricité renouvelable. Cette évolution mondiale montre l'importance de l'énergie éolienne : elle relie une longue histoire d'usages pratiques à un avenir orienté vers une énergie durable, propre et largement accessible.

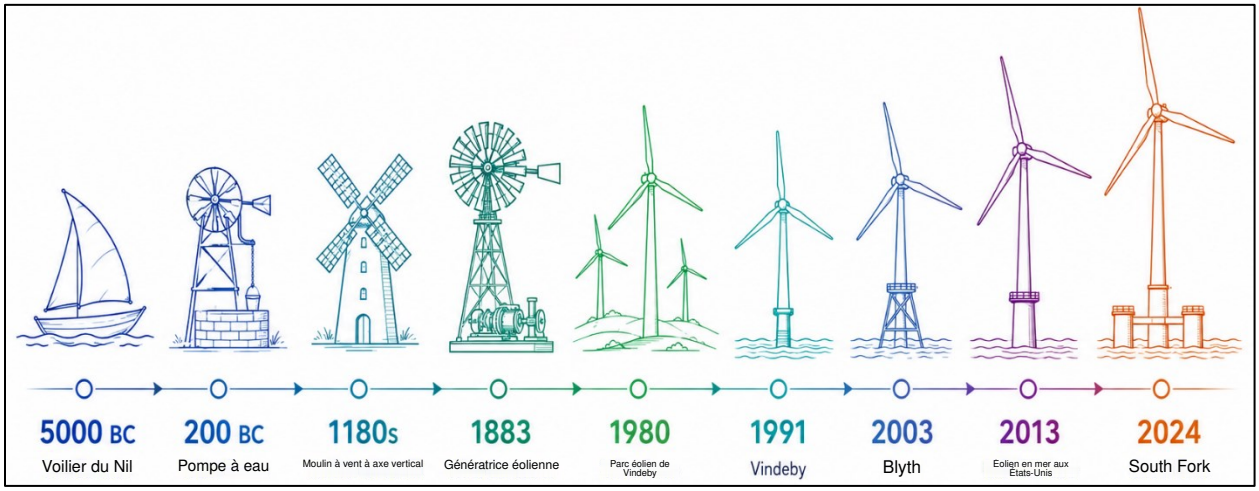


Figure 1.1: Histoire de l'utilisation de l'énergie éolienne.

1.2 Retracer l'évolution des éoliennes

Au fil de plusieurs siècles d'expérimentation et d'amélioration technologique, l'énergie éolienne est passée de simples moulins mécaniques à des éoliennes perfectionnées produisant de l'électricité. Les premiers moulins à vent de Perse, de Chine et de l'Europe médiévale servaient surtout au pompage de l'eau et à la mouture des céréales, tandis que les moulins américains multipales apparus plus tard ont joué un rôle important dans l'approvisionnement en eau des zones rurales. La transition majeure a commencé à la fin du XIXe siècle, lorsque des inventeurs comme Poul la Cour, au Danemark, ont démontré que le vent pouvait produire de l'électricité. Au XXe siècle, les modèles sont devenus plus grands et leur conception plus scientifique, avec des jalons importants tels que l'éolienne Smith–Putnam, l'éolienne de Gedser et les modèles allemands équipés de pales en fibre de verre. Ces évolutions ont contribué à établir les principes fondamentaux de l'éolienne moderne : pales aérodynamiques, systèmes de freinage fiables,

raccordement au réseau et commande améliorée. L'article fourni souligne que de nombreuses éoliennes modernes trouvent l'origine de leur conception dans les innovations danoises mises au point entre les années 1950 et 1970. Le tableau 1.1 présente une liste des éoliennes créées des années 1180 à 2022.

Tableau 1.1 : Histoire de l'évolution des éoliennes de 1180 à 2022.

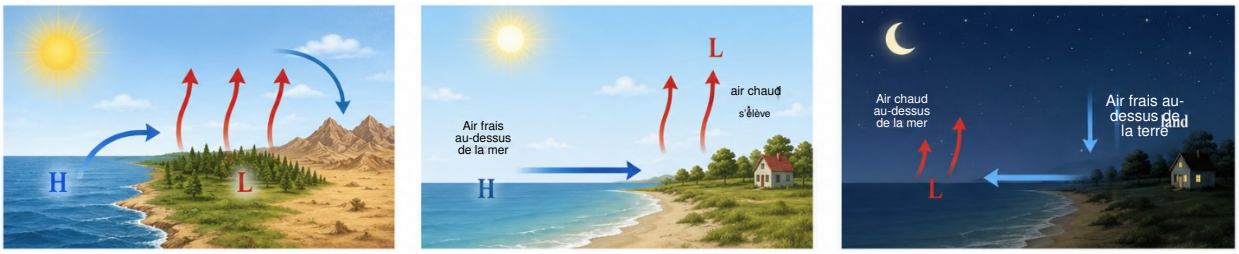
Année	Nom/type	Lieu	Description
Années 1180	Moulins sur pivot européens	France et Angleterre	Premiers moulins européens utilisés pour moudre les céréales.
1854	Moulin Halladay	Ellington, Connecticut, États-Unis	Prototype de moulin américain multipale destiné au pompage de l'eau.
1891	Moulin de Poul la Cour	Askov, Danemark	Premier moulin produisant de l'électricité.
1919	Moulin Agricco	Danemark	Moulin aérodynamique appliquant des principes de pales issus de l'aéronautique.
1941	Éolienne Smith–Putnam	Grandpa's Knob, Vermont, États-Unis	Grande éolienne expérimentale de 1,25 MW.
1957	Éolienne de Gedser	Gedser, Danemark	Fondement majeur de la conception des éoliennes modernes.
1958	Allgaier–Hütter StGW-34	Stötten, Allemagne	Première éolienne dotée de pales en fibre de verre.
1978	Éolienne de Tvind	Ulfborg, Danemark	Éolienne de 2 MW et étape importante de l'éolien danois.
1991	Parc éolien en mer de Vindeby	Vindeby, Danemark	Premier parc éolien en mer au monde.
2022	Éoliennes GE de 2,82 MW	Buffalo Ridge, États-Unis	Exemple d'éoliennes plus récentes, de plus grande taille et de puissance supérieure.

À partir des années 1970, l'énergie éolienne est passée du statut de technologie expérimentale à celui d'industrie mondiale des énergies renouvelables. Les crises pétrolières, les préoccupations environnementales et la nécessité de disposer d'une énergie propre produite localement ont incité des pays comme le Danemark, les États-Unis, l'Allemagne, l'Espagne, la Chine et l'Inde à investir dans l'énergie éolienne. Le Danemark a joué un rôle de premier plan en développant le « concept danois », fondé sur des éoliennes tripales raccordées au réseau, qui est devenu le modèle d'une grande partie de l'industrie moderne. L'éolien en mer a également pris de l'importance après la mise en service, en 1991, du premier parc éolien en mer à Vindeby, au Danemark. Au XXIe siècle, la taille et le rendement des éoliennes, ainsi que la puissance installée, ont augmenté rapidement, et l'éolien est devenu l'une des principales sources d'énergie renouvelable non hydraulique dans le monde. Selon l'AIE, l'éolien a produit plus de 2 330 TWh d'électricité en 2023, et le GWEC a fait état d'un record mondial de 117 GW de nouvelles installations éoliennes en 2023. Ces chiffres montrent comment l'énergie éolienne est passée d'un usage mécanique local à une contribution majeure à la production mondiale d'électricité propre.

2 Principes fondamentaux du vent en tant que ressource énergétique

2.1 Production de l'énergie éolienne à partir des mouvements atmosphériques

Le vent est principalement engendré par le réchauffement inégal de la surface terrestre par le Soleil. Les différentes surfaces, comme les terres, les étendues d'eau, les forêts et les déserts, absorbent et restituent la chaleur à des vitesses différentes. Lorsque l'air situé au-dessus d'une surface chaude se réchauffe, il devient plus léger et s'élève. De l'air plus froid et plus dense provenant des zones voisines vient alors le remplacer (figure 1.2-a). Ce déplacement d'air d'un endroit à un autre crée le vent. La direction et la force du vent sont également influencées par les différences de pression atmosphérique, la rotation de la Terre et les conditions locales, telles que les montagnes, les vallées, les littoraux et les variations de température entre le jour et la nuit. L'air se déplace naturellement des zones de haute pression vers les zones de basse pression ; plus la différence de pression est importante, plus le vent est fort. Ce mouvement continu de l'air constitue la source fondamentale de l'énergie éolienne.



(a) **(b)** **(c)**

Figure 1.2: Formation du vent: (a) formation générale du vent, (b) brise de mer et (c) brise de terre.

Près du littoral, le vent est principalement dû au fait que la terre et l'eau ne se réchauffent ni ne se refroidissent à la même vitesse. Pendant la journée (figure 1.2-b), le Soleil réchauffe la terre beaucoup plus rapidement que la mer. Lorsque la terre devient chaude, elle chauffe également l'air qui la surplombe. Cet air chaud, devenu plus léger, s'élève et laisse au-dessus de la terre une zone de plus basse pression. Dans le même temps, l'air au-dessus de la mer reste plus frais et plus lourd, car l'eau se réchauffe plus lentement. Pour combler l'espace laissé par l'air chaud ascendant, l'air plus frais situé au-dessus de la mer se déplace vers la terre. Ce mouvement d'air est appelé brise de mer. En termes simples, pendant la journée, le vent souffle souvent de la mer vers la côte parce que la terre est plus chaude et attire l'air frais vers l'intérieur des terres.

La nuit, le processus s'inverse généralement (figure 1.2-c). Après le coucher du soleil, la terre perd rapidement sa chaleur, tandis que la mer la conserve plus longtemps. L'air au-dessus de la mer devient donc relativement plus chaud que l'air au-dessus de la terre. L'air plus chaud situé au-dessus de la mer s'élève, créant une pression plus faible au-dessus de l'eau. L'air plus frais et plus lourd provenant de la terre se déplace alors vers la mer pour le remplacer. Il se crée ainsi une brise de terre, dans laquelle le vent souffle de la terre vers l'eau. Ce cycle quotidien explique pourquoi les littoraux sont souvent venteux : la différence de température entre la terre et la mer crée un système naturel « d'échange d'air ». Ce phénomène est très important pour l'énergie éolienne, car les zones côtières et en mer bénéficient généralement de vents plus réguliers, plus forts et plus prévisibles que de nombreuses régions intérieures, ce qui en fait de bons emplacements pour les éoliennes.

2.2 Principales propriétés du vent

Le vent n'est pas seulement de « l'air en mouvement ». En énergie éolienne, il présente plusieurs propriétés techniques importantes qui déterminent la quantité d'énergie pouvant être captée, l'orientation requise de l'éolienne et la fiabilité de la puissance produite. Les quatre propriétés les plus importantes sont la vitesse, la direction, la variabilité et la masse volumique. Le tableau 1.2 explique ces propriétés essentielles sur les plans technique et intuitif, avec un exemple.

Tableau 1.2: Principales propriétés du vent en énergie éolienne.

Vitesse du vent	
Techniquement	**Intuitivement**
La vitesse du vent est la vitesse à laquelle l'air se déplace ; elle est généralement mesurée en mètres par seconde (m/s). C'est la propriété la plus importante en énergie éolienne, car la puissance disponible dans le vent augmente très fortement avec sa vitesse. D'un point de vue technique, la puissance du vent est proportionnelle au cube de sa vitesse. Par conséquent, si la vitesse du vent double, la puissance éolienne disponible est multipliée par environ huit.	Une brise légère est douce, alors qu'un vent fort peut pousser des arbres, des vagues ou même des personnes. Une faible augmentation de la vitesse du vent peut fortement accroître la force et l'énergie transportées par l'air. Pour les éoliennes, cela signifie que des sites dont la vitesse moyenne du vent est légèrement supérieure peuvent produire beaucoup plus d'électricité sur une année.
Exemple	
Une éolienne fonctionnant avec un vent de 6 m/s produira beaucoup moins d'énergie que la même éolienne soumise à un vent de 9 m/s. Bien que 9 m/s ne soit que 50 % supérieur à 6 m/s, ce vent contient plus de trois fois plus de puissance disponible en raison de la relation cubique.	
Direction du vent	
Techniquement	**Intuitivement**
La direction du vent indique d'où il vient. Par exemple, un « vent du nord » souffle du nord vers le sud. La direction est importante, car une éolienne doit être correctement orientée face au vent pour capter efficacement l'énergie. Les éoliennes modernes à axe horizontal utilisent un système d'orientation en lacet pour faire pivoter la nacelle et le rotor de manière que les pales soient face au vent incident. Si l'éolienne n'est pas alignée sur le vent, la surface effective exposée au vent diminue et l'éolienne capte moins d'énergie. Un défaut d'alignement peut également créer des charges mécaniques inégales sur les pales, la tour et la chaîne cinématique.	Cela revient à tenir un parapluie par vent fort. S'il est directement face au vent, il en reçoit toute la force. S'il est tourné de côté, le vent s'écoule différemment autour de lui et la force change. Une éolienne fonctionne de manière similaire : elle doit « regarder » le vent.
Exemple	
Si, sur un site donné, le vent vient généralement du sud-ouest, les éoliennes peuvent être disposées de façon à offrir leur meilleur rendement sous cette direction dominante. Dans un parc éolien, l'espacement des éoliennes est également défini en fonction des directions de vent courantes afin de réduire les effets de sillage derrière les machines.	
Variabilité du vent	
Techniquement	**Intuitivement**

La variabilité signifie que la vitesse et la direction du vent changent au fil du temps. Le vent n'est pas constant. Il peut varier d'une minute, d'une heure ou d'une saison à l'autre, ainsi que d'un lieu à l'autre. Cette variabilité résulte des systèmes météorologiques, des différences de température, du relief, de la rugosité de surface et des cycles quotidiens de réchauffement et de refroidissement. D'un point de vue technique, elle influence le fonctionnement des éoliennes, la prévision de la production, l'intégration au réseau et les charges mécaniques. Comme la puissance du vent dépend fortement de sa vitesse, même de faibles fluctuations peuvent entraîner d'importantes variations de la puissance produite. Les éoliennes doivent donc recourir à des systèmes de commande, comme la commande du pas des pales et la commande de la génératrice, pour réagir de manière sûre et efficace aux changements de vent.	Le vent se comporte comme un écoulement naturel qui s'ajuste en permanence. Il est parfois régulier et stable, surtout en mer, et parfois turbulent et irrégulier, notamment à proximité de bâtiments, de forêts, de collines ou de montagnes. C'est pourquoi les ingénieurs étudient des données de vent à long terme avant de choisir le site d'un parc éolien.
Exemple	
Sur un site côtier, le vent peut être plus fort l'après-midi, parce que la terre se réchauffe et crée une brise de mer. La nuit, le vent peut faiblir ou changer de direction. Une éolienne installée à cet endroit doit fonctionner dans ces conditions quotidiennes variables, et les estimations de production d'énergie doivent les prendre en compte.	
Masse volumique de l'air	
Techniquement	**Intuitivement**
La masse volumique de l'air correspond à la masse d'air contenue dans un volume donné ; elle est généralement mesurée en kilogrammes par mètre cube (kg/m^3). Un air plus dense contient davantage de masse et transporte donc plus d'énergie cinétique à vitesse égale. La masse volumique de l'air dépend principalement de la température, de la pression, de l'humidité et de l'altitude. D'un point de vue technique, la puissance disponible dans le vent est directement proportionnelle à la masse volumique de l'air. Ainsi, à vitesse du vent et dimensions du rotor identiques, une éolienne produit davantage de puissance dans un air dense et moins dans un air peu dense. L'air froid est généralement plus dense que l'air chaud, et l'air à basse altitude est plus dense que l'air à haute altitude.	Un air dense ressemble à un écoulement plus lourd qui pousse les pales de l'éolienne. Un air peu dense ressemble à un écoulement plus léger, qui exerce moins de force. C'est l'une des raisons pour lesquelles les éoliennes de régions côtières froides ou de faible altitude peuvent présenter un meilleur rendement que des machines semblables situées dans des régions chaudes ou en altitude, à vitesse du vent égale.
Exemple	
Une éolienne fonctionnant au niveau de la mer par temps frais peut produire davantage de puissance que la même éolienne exploitée en altitude par temps chaud, même si la vitesse du vent est identique. Cette différence provient de la masse volumique de l'air : l'air plus frais et de plus basse altitude est plus lourd et transporte davantage d'énergie.	

3 Rôle de l'énergie éolienne dans les systèmes électriques modernes

3.1 Contribution de l'énergie éolienne à la production d'électricité

L'énergie éolienne est devenue l'une des principales sources renouvelables de production d'électricité dans le monde. Au cours des dernières décennies, les progrès de la technologie des éoliennes, le développement de l'éolien en mer, l'évolution des méthodes de raccordement au réseau et les politiques énergétiques ont permis à l'éolien de couvrir une part croissante de la demande nationale d'électricité. La figure 1.3 illustre cette évolution mondiale en comparant la contribution de l'énergie éolienne à la production d'électricité dans certains pays et à la moyenne mondiale. Elle montre que certains pays, en particulier le Danemark et le Royaume-Uni, ont intégré l'éolien à un niveau beaucoup plus élevé, tandis que d'autres progressent plus graduellement. Cette tendance met en évidence le passage de l'énergie éolienne du statut de petite ressource de substitution à celui de composante majeure des systèmes électriques modernes.

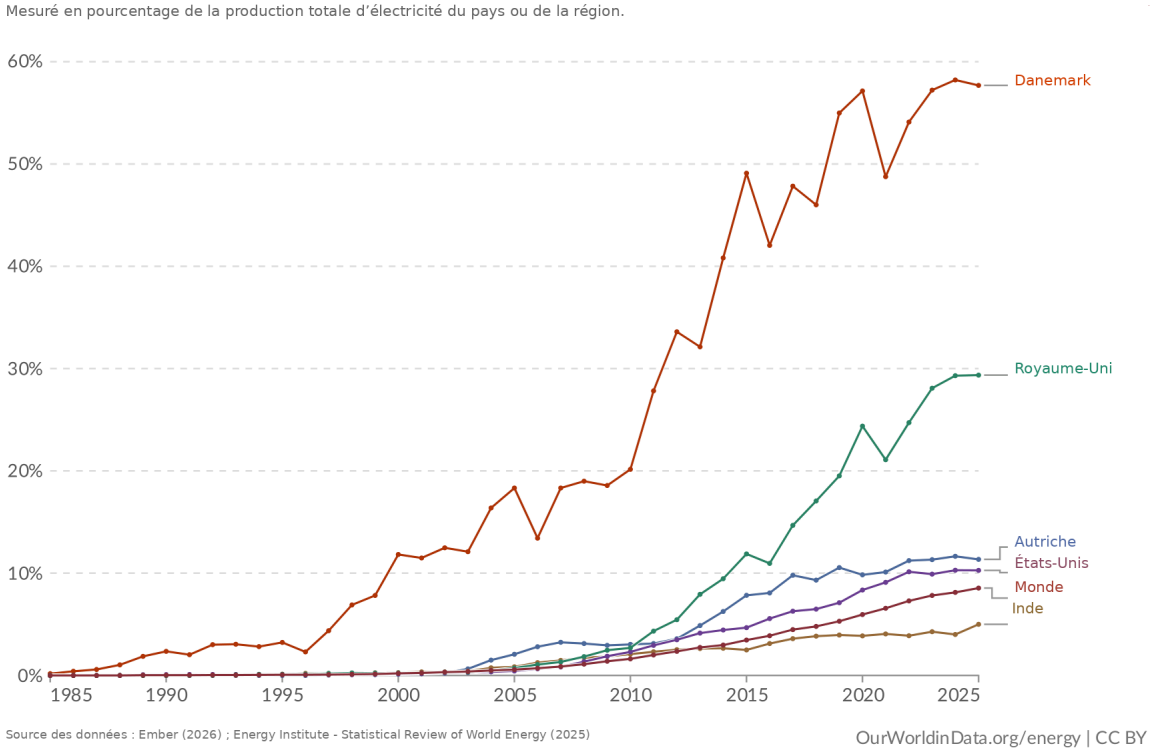


Figure 1.3: Part de la production d'électricité issue de l'énergie éolienne.

Du point de vue des systèmes électriques, l'augmentation de la part de la production éolienne modifie la planification et l'exploitation des réseaux. La production éolienne étant variable, les systèmes électriques présentant une forte pénétration de l'éolien exigent des prévisions plus performantes, une production flexible, des moyens de stockage d'énergie, une réponse de la demande, un renforcement du transport et une commande avancée du réseau. Des pays comme le Danemark démontrent qu'une part très élevée d'éolien est techniquement possible lorsque le réseau est bien interconnecté et soutenu par des stratégies d'exploitation flexibles. Cependant, les parts plus faibles observées dans de grands systèmes comme ceux des États-Unis et de l'Inde, ainsi que dans la moyenne mondiale, montrent que l'intégration dépend de la taille du réseau, de l'organisation

du marché, de la localisation des ressources, de la disponibilité du transport et du soutien politique. Globalement, la tendance de la figure montre que l'énergie éolienne n'est plus une simple source renouvelable supplémentaire : elle devient un élément central des systèmes électriques modernes et un outil important pour réduire la dépendance à l'égard des combustibles fossiles et les émissions du secteur électrique.

3.2 Applications éoliennes terrestres et en mer

Cette section présente les applications et les différences entre les centrales éoliennes terrestres et en mer. La figure 1.4 donne un aperçu général des deux types.



(a) **(b)**

Figure 1.4: Comparaison entre l'éolien (a) terrestre et (b) en mer (source: https://jmhpower.com).

3.2.1 Éoliennes terrestres

Les éoliennes terrestres sont installées sur la terre ferme, généralement dans des zones ouvertes où les vents sont forts et réguliers, comme les plaines, les collines, les crêtes, les déserts et les régions agricoles (figure 1.4-a). Il s'agit du type d'éolienne le plus courant, car sa construction, son exploitation et sa maintenance sont généralement plus simples et moins coûteuses que celles des éoliennes en mer. Les fondations, les routes, les raccordements électriques et les accès de maintenance peuvent être réalisés au moyen de méthodes classiques de construction terrestre. Les éoliennes terrestres sont largement utilisées dans les parcs de grande puissance, les projets énergétiques communautaires, l'alimentation électrique industrielle et l'électrification rurale.

Le principal intérêt des éoliennes terrestres réside dans leur coût relativement faible et leur installation plus rapide. Elles conviennent aux sites où des terrains sont disponibles et où la ressource éolienne est suffisamment forte pour assurer une production d'électricité économiquement viable. Les parcs éoliens terrestres peuvent être directement raccordés à des réseaux de transport ou de distribution proches, ce qui réduit la complexité des infrastructures. Leur utilisation peut toutefois être limitée par les conflits d'usage des sols, l'impact visuel, les préoccupations liées au bruit, la protection de la faune

et une moindre régularité du vent par rapport aux sites en mer. Malgré ces limites, l'éolien terrestre demeure une solution importante et pratique pour développer la production d'électricité renouvelable.

3.2.2 Éoliennes en mer

Les éoliennes en mer sont installées dans des étendues d'eau, généralement dans les mers ou les océans, près du littoral ou plus au large (figure 1.4-b). Elles sont souvent plus grandes que les éoliennes terrestres, car les sites maritimes offrent des vents plus forts, plus réguliers et plus constants. Comme la mer comporte moins d'obstacles physiques — bâtiments, arbres ou collines — l'écoulement du vent y est moins turbulent et peut produire davantage d'énergie. Les parcs éoliens en mer sont couramment exploités par les pays qui disposent de fortes ressources éoliennes côtières, de peu de terrains disponibles ou d'une demande d'électricité élevée à proximité de villes côtières et de zones industrielles.

Le principal intérêt des éoliennes en mer est leur fort potentiel de production énergétique. Les sites en mer peuvent accueillir de très grandes éoliennes et de vastes parcs, sans subir autant de restrictions d'usage des sols ou d'impact visuel que les sites terrestres. Ils sont particulièrement utiles dans les pays densément peuplés, où les terrains appropriés sont rares. Toutefois, les éoliennes en mer sont plus coûteuses à installer et à entretenir, car elles nécessitent des fondations marines, des câbles sous-marins, des navires spécialisés, une protection contre la corrosion et des raccordements au réseau plus complexes. Malgré ces difficultés, l'éolien en mer prend une importance croissante, car il peut fournir de grandes quantités d'électricité propre à proximité des centres de consommation côtiers et contribuer aux objectifs nationaux de décarbonation.

4 Importance de l'énergie éolienne dans la transition énergétique

4.1 Comment l'énergie éolienne contribue-t-elle à la décarbonation et aux objectifs climatiques?

L'énergie éolienne contribue à la décarbonation en remplaçant une électricité qui serait autrement produite à partir de combustibles fossiles tels que le charbon, le pétrole et le gaz naturel. Comme les éoliennes produisent de l'électricité sans brûler de combustible pendant leur fonctionnement, elles contribuent à réduire les émissions de dioxyde de carbone du secteur électrique. Les figures 1.3 et 1.5 présentent deux tendances liées : tandis que la part des émissions mondiales de CO_2 imputable aux grandes économies industrielles telles que les États-Unis, l'Union européenne et le Royaume-Uni a généralement diminué au fil du temps, la part de l'électricité produite à partir du vent a fortement augmenté, surtout dans les pays bénéficiant de politiques et de ressources éoliennes favorables. Ce contraste explique pourquoi l'énergie éolienne est considérée comme un outil important de lutte contre le changement climatique : à mesure que davantage d'électricité éolienne est injectée sur le réseau, le recours à une production fortement émettrice à partir de combustibles fossiles peut diminuer. À l'échelle mondiale, les données relatives à la puissance éolienne installée indiquent qu'une puissance totale de 837 GW répartie dans 31 pays a produit environ 2 186 TWh d'électricité en 2021, ce qui correspond à une réduction de 1 311 Mt de CO_2.

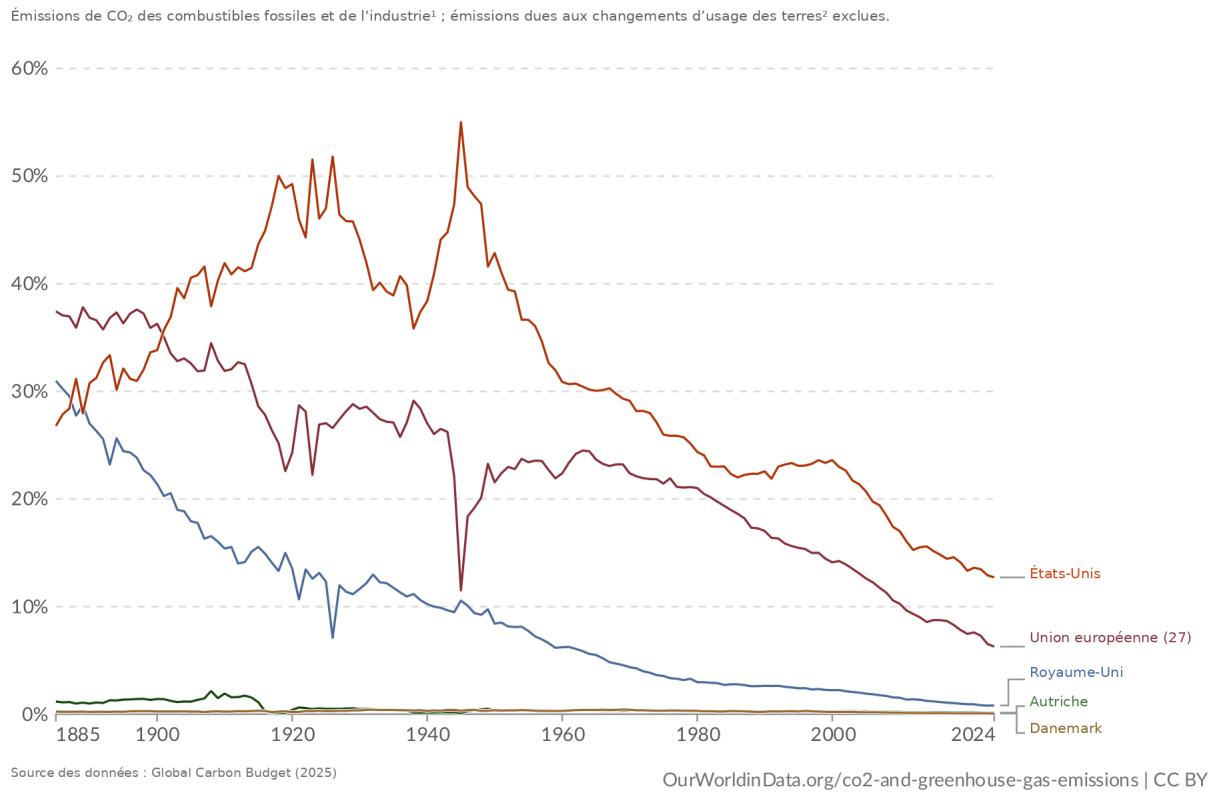


Figure 1.5 : Part des émissions mondiales de CO_2 (comparer les tendances avec celles de la figure 1.3).

En résumé, du point de vue climatique, cette croissance contribue aux objectifs nationaux et internationaux de réduction des émissions de gaz à effet de serre, d'amélioration de la sécurité énergétique et de transition vers des systèmes électriques plus propres. L'énergie éolienne n'est donc pas seulement une technologie renouvelable ; elle constitue une voie pratique pour réduire la production d'électricité à forte intensité de carbone et orienter les systèmes électriques vers une décarbonation à long terme.

5 Principaux défis et possibilités

5.1 Défis techniques, environnementaux et économiques

• **Défis techniques Bien que l'énergie éolienne soit l'une des technologies renouvelables de** production d'électricité les plus matures et les plus compétitives en matière de coûts, son déploiement à grande échelle soulève plusieurs défis techniques, environnementaux et économiques. Il convient de souligner que l'éolien contribue déjà fortement à la production d'électricité dans de nombreux pays, mais que son développement futur exige une meilleure intégration dans les systèmes énergétiques, sociaux, environnementaux et commerciaux au sens large. Le principal défi tient à la variabilité de l'énergie éolienne : la production d'électricité dépend des conditions de vent, qui changent selon l'heure, le jour, la saison et le lieu. Lorsque la part de l'éolien est faible, le système électrique existant peut généralement absorber cette variabilité. En revanche, lorsque sa pénétration augmente, le système doit gagner en flexibilité grâce au renforcement des réseaux de transport, aux

technologies de stockage, au couplage des secteurs, aux réseaux intelligents et à de meilleures prévisions. Les systèmes dominés par l'éolien peuvent aussi nécessiter des moyens de réserve et de nouvelles sources de services auxiliaires, car la production éolienne se substitue aux centrales thermiques classiques, qui fournissent traditionnellement l'inertie et contribuent à la stabilité du réseau.

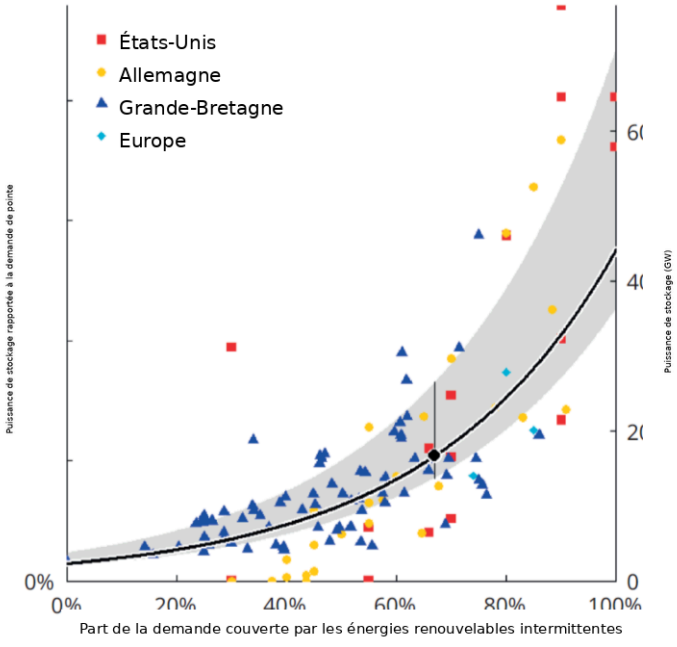


Figure 1.6 : Besoins de stockage en fonction de la part de la demande couverte par les énergies renouvelables intermittentes.

• Défis environnementaux Sur le plan environnemental, il convient de souligner que l'énergie éolienne a des incidences climatiques bien moindres que les combustibles fossiles, mais qu'elle n'en est pas exempte. Les parcs éoliens terrestres peuvent affecter les oiseaux et les chauves-souris par des collisions, des perturbations et la dégradation de leurs habitats. La construction des parcs en mer peut produire un bruit sous-marin susceptible de toucher des mammifères marins comme les marsouins, les baleines, les dauphins et les phoques. Les grands parcs peuvent également influencer la ressource éolienne locale et les conditions météorologiques en créant des effets de sillage, en réduisant la vitesse du vent en aval et en modifiant légèrement la température, les précipitations ou l'évaporation locales. Ces effets sont généralement beaucoup moins importants que les conséquences mondiales du changement climatique, mais ils exigent néanmoins une planification attentive. Les solutions comprennent le choix stratégique des sites, le micro-positionnement, les arrêts temporaires, l'ajustement des vitesses de démarrage, l'amélioration de la disposition des parcs et un meilleur suivi environnemental avant et après la construction.

• Défis économiques Les défis économiques sont également importants, car l'énergie éolienne influe sur les marchés de l'électricité et les économies locales. Son coût marginal d'exploitation étant très faible, l'éolien peut réduire les prix de gros de l'électricité par l'effet d'ordre de préséance économique. Cette baisse peut profiter aux consommateurs, mais aussi diminuer les recettes des producteurs et compliquer les décisions d'investissement, surtout lorsque les parcs éoliens produisent simultanément et réduisent ainsi leur propre valeur marchande ; ce phénomène est appelé effet de

« cannibalisation ». En outre, une part plus élevée d'éolien peut accroître les coûts d'équilibrage et des services auxiliaires, car les systèmes électriques doivent gérer la variabilité du vent. À l'échelle locale, les projets éoliens peuvent procurer des avantages économiques — emplois, loyers, infrastructures et revenus communautaires — mais ils peuvent également susciter des préoccupations concernant la valeur foncière, le tourisme, les droits relatifs aux terres et la répartition équitable des avantages. Pour cette raison, la refonte du marché, une indemnisation équitable, la participation des communautés et une planification améliorée constituent des solutions essentielles pour rendre le déploiement de l'éolien à la fois économiquement efficace et socialement acceptable.

5.2 Innovations et possibilités futures de la technologie éolienne

La technologie éolienne évolue au-delà de la simple installation d'éoliennes vers des systèmes énergétiques plus intelligents, plus vastes et mieux intégrés. L'une des principales possibilités futures réside dans le développement d'éoliennes plus grandes et plus efficaces, en particulier pour les parcs en mer, où les vents sont plus forts et plus stables. Des rotors plus grands, des tours plus hautes, une meilleure aérodynamique des pales et des matériaux avancés permettent de capter davantage d'énergie à partir de la même ressource éolienne. L'éolien en mer est particulièrement important, car il peut produire de grandes quantités d'électricité à proximité des centres de consommation côtiers, tout en réduisant certains conflits d'usage des sols associés à l'éolien terrestre. L'éolien flottant constitue une technologie d'avenir prometteuse, car il peut donner accès à des zones d'eaux plus profondes, dotées de ressources éoliennes plus fortes, et atténuer certaines incidences visuelles et sociales à terre.

Une autre innovation importante concerne l'amélioration des technologies d'intégration au réseau. À mesure que l'éolien représente une part plus importante de la production d'électricité, les futurs systèmes électriques auront besoin de davantage de flexibilité, de stockage et de commandes intelligentes. Les batteries peuvent contribuer à équilibrer les variations à court terme de la production éolienne, tandis que l'hydrogène et d'autres solutions de stockage de longue durée peuvent aider à gérer les variations saisonnières. Les réseaux intelligents, les prévisions avancées, l'électronique de puissance et les systèmes de commande numériques permettront aux parcs éoliens de fournir des services de soutien au réseau, comme la réponse en fréquence, la régulation de la tension et les réserves d'exploitation. Ainsi, les futures éoliennes ne se contenteront pas de produire de l'électricité : elles participeront activement à la stabilité du système électrique.

La numérisation et l'exploitation intelligente offrent également des possibilités majeures. Les parcs éoliens modernes utilisent de plus en plus des capteurs, des systèmes de supervision, de contrôle et d'acquisition de données (SCADA), l'intelligence artificielle, la surveillance de l'état et les jumeaux numériques pour prévoir les pannes, optimiser les performances et réduire les coûts de maintenance. Ces technologies peuvent prolonger la durée de vie des éoliennes, réduire les indisponibilités et améliorer la fiabilité. Ainsi, au lieu d'attendre qu'une panne du multiplicateur de vitesse, d'une pale ou de la génératrice se produise, les exploitants peuvent utiliser les données en temps réel pour détecter des signes précurseurs et programmer la maintenance avant la défaillance. Cette possibilité est particulièrement précieuse pour les parcs en mer, où la maintenance est plus coûteuse et dépend des conditions météorologiques.

La technologie éolienne de demain devra également devenir plus durable sur les plans environnemental et social. Les incidences sur la faune, les effets de sillage, l'acceptation locale, les retards d'autorisation et les déchets en fin de vie

constituent des difficultés importantes pour le déploiement de l'éolien. Des innovations telles que l'amélioration du choix des sites, les systèmes d'arrêt commandés par radar, les dispositifs ultrasonores d'éloignement des chauves-souris, la peinture des pales pour les rendre plus visibles aux oiseaux et une meilleure conception de la disposition des éoliennes peuvent réduire les incidences environnementales. Parallèlement, les pales recyclables, l'amélioration du recyclage des aimants à terres rares, les composants modulaires et la conception fondée sur l'économie circulaire peuvent réduire les déchets et la dépendance à l'égard des matières premières. Ces innovations aideront l'énergie éolienne à se développer tout en répondant aux préoccupations relatives aux écosystèmes, aux communautés et à l'approvisionnement en ressources.

Dans l'ensemble, l'avenir de l'énergie éolienne dépend de la combinaison des progrès techniques, d'une meilleure planification, de systèmes électriques plus intelligents et d'une responsabilité environnementale accrue. La prochaine génération de technologies éoliennes comprendra probablement de plus grandes éoliennes en mer, des plateformes flottantes, des matériaux recyclables, une surveillance numérique, des systèmes hybrides éolien-stockage et des applications de conversion de l'électricité éolienne en hydrogène. Ces possibilités montrent que l'énergie éolienne n'est pas une technologie achevée : elle continue d'évoluer pour devenir un pilier plus puissant, plus flexible et plus durable de la décarbonation mondiale.

Résumé de la séance

Cette séance a présenté l'énergie éolienne à la fois comme une ressource naturelle ancienne et comme un pilier moderne de la production d'électricité propre. Elle a d'abord retracé l'évolution historique de l'utilisation du vent, depuis la navigation, le pompage de l'eau et la mouture des céréales jusqu'à l'apparition des éoliennes produisant de l'électricité et aux grands parcs terrestres et en mer actuels. Des jalons importants, tels que les moulins européens sur pivot, le moulin Halladay, le moulin de Poul la Cour produisant de l'électricité, l'éolienne de Gedser, l'éolienne de Tvind et le parc en mer de Vindeby, ont montré comment la technologie éolienne a progressivement évolué grâce à l'amélioration de l'aérodynamique, à l'augmentation de la taille des rotors, à de meilleurs matériaux, au raccordement au réseau et aux systèmes de commande. La séance a également expliqué que le vent se forme par des mouvements atmosphériques résultant d'un réchauffement solaire inégal, de différences de pression et des écarts de température entre la terre et la mer, notamment avec les brises de mer le jour et les brises de terre la nuit. Les apprenants ont aussi étudié les principales propriétés du vent — vitesse, direction, variabilité et masse volumique — ainsi que l'incidence de chacune sur le rendement des éoliennes, la production d'énergie, le choix des sites et la prévision de la production.

La séance a ensuite relié l'énergie éolienne aux systèmes électriques modernes, aux objectifs climatiques et à l'évolution future de la technologie. Elle a montré que l'éolien apporte désormais une contribution majeure à la production d'électricité dans des pays comme le Danemark et le Royaume-Uni, tout en poursuivant sa croissance dans le monde. Les éoliennes terrestres ont été présentées comme économiques et plus faciles à installer, tandis que les éoliennes en mer ont été décrites comme plus grandes, plus productives et adaptées aux fortes ressources éoliennes côtières. Le rôle de l'éolien dans la décarbonation a été souligné en montrant que l'électricité éolienne peut remplacer la production à partir de combustibles fossiles, réduire les émissions de CO , améliorer la sécurité énergétique et contribuer aux objectifs climatiques à long terme. Dans le même temps, la séance a traité les principaux défis, notamment la variabilité du vent, les besoins de stockage, l'intégration au réseau, les incidences sur la faune, les effets de sillage, les effets sur les prix du marché, les conflits d'usage des sols et l'acceptation locale. Enfin, elle a mis en évidence des possibilités futures telles que des éoliennes en mer de plus grande taille, des plateformes éoliennes flottantes, les réseaux intelligents, les prévisions avancées, les jumeaux numériques, les pales recyclables, le recyclage des terres rares, les systèmes hybrides éolien-stockage et les applications éolien-hydrogène, ce qui montre que l'énergie éolienne continue d'évoluer vers une technologie énergétique plus flexible, plus fiable et plus durable.

W1-02 : Principes aérodynamiques fondamentaux de la conversion de l'énergie éolienne

Objectifs d'apprentissage

- Expliquer les principes aérodynamiques qui sous-tendent la conversion de l'énergie éolienne.
- Appliquer l'équation fondamentale de la puissance du vent.
- Comprendre l'aérodynamique et les performances des pales.
- Analyser l'influence de l'aérodynamique sur la conception des éoliennes.
- Identifier les principaux compromis de conception aérodynamique et structurelle.

Résumé :

Ce cours propose une introduction complète à l'aérodynamique éolienne et à son application dans les systèmes modernes de production d'énergie éolienne. Il commence par examiner le rôle de l'aérodynamique dans la chaîne de conversion de l'énergie éolienne, depuis le déplacement de l'air à travers le rotor jusqu'à la production de puissance électrique. Les apprenants étudieront les principes fondamentaux de la conversion de l'énergie éolienne, notamment l'énergie cinétique disponible dans le vent, l'extraction de puissance de l'écoulement d'air, le coefficient de puissance et la limite théorique de rendement décrite par la loi de Betz. Le cours présente ensuite les forces aérodynamiques essentielles, en mettant l'accent sur la portance, la traînée, la géométrie des profils aérodynamiques, la distribution de pression, l'angle d'attaque et le comportement au décrochage. À partir de ces bases, les apprenants étudieront l'aérodynamique du rotor, notamment la conception des pales, le rapport de vitesse en bout de pale, la surface balayée et leur influence sur le rendement de l'éolienne. Les mécanismes de commande aérodynamique, tels que la commande du pas des pales, la régulation par décrochage, la commande active et l'alignement en lacet, sont également abordés du point de vue d'un fonctionnement sûr et efficace de l'éolienne. Le cours examine en outre l'interaction entre l'aérodynamique et la conception structurelle en traitant les charges sur les pales et la tour, la fatigue, les conditions extrêmes et les compromis entre performances et durabilité. À l'échelle du parc éolien, les apprenants étudieront les effets de sillage, l'espacement des éoliennes, l'influence du relief et les conditions atmosphériques qui affectent la production globale d'énergie. Enfin, le cours présente des stratégies d'optimisation de la conception et des outils de calcul modernes, notamment la simulation et les notions fondamentales de mécanique des fluides numérique (CFD), afin d'améliorer la captation d'énergie et de réduire les pertes du système.

1 Introduction à l'aérodynamique éolienne et aux types d'éoliennes

L'aérodynamique éolienne explique comment l'air en mouvement interagit avec les pales d'une éolienne pour produire une énergie utile. Cette section présente le rôle fondamental de l'écoulement d'air, du mouvement du rotor et des forces aérodynamiques dans les systèmes éoliens.

1.1 Rôle de l'aérodynamique dans les systèmes éoliens

L'aérodynamique joue un rôle central dans les systèmes éoliens, car elle détermine l'efficacité avec laquelle l'énergie cinétique de l'air en mouvement peut être convertie en énergie mécanique puis électrique. Lorsque le vent traverse la surface du rotor, les pales interagissent avec l'écoulement et produisent des forces aérodynamiques, principalement la portance et la traînée. Ces forces créent le couple nécessaire pour faire tourner le rotor et entraîner la génératrice. La puissance disponible dans le vent dépend fortement de la vitesse du vent et de la surface balayée par le rotor, tandis que la conception aérodynamique de l'éolienne détermine la part de cette énergie disponible qui peut être captée. De bonnes performances aérodynamiques améliorent le rendement, réduisent les pertes d'énergie et aident l'éolienne à fonctionner en toute sécurité lorsque les conditions de vent varient. Elles influencent également les charges sur les pales, le bruit, les vibrations et la durabilité structurelle à long terme. L'aérodynamique est donc essentielle non seulement à la production de puissance, mais aussi à la fiabilité de la conception de l'éolienne.

1.1.1 Principe de production de puissance

L'aérodynamique est le principal principe physique qui permet à une éolienne de convertir l'air en mouvement en puissance mécanique utile. Le vent transporte de l'énergie cinétique parce que l'air possède une masse et une vitesse. Lorsque le vent traverse la surface balayée par le rotor A_r, le volume d'air traversant le rotor pendant un court intervalle dt est $dV = A_r v\, dt$, où v est la vitesse du vent. Si la masse volumique de l'air est ρ, la masse d'air traversant le rotor est $dm = \rho A_r v\, dt$. L'énergie cinétique de cet air en mouvement est :

$$dE_{kin} = \frac{1}{2} dm v^2 \qquad (2.1)$$

En remplaçant le débit massique dans cette expression, on obtient la puissance disponible dans le vent :

$$P_{wind} = \frac{dE}{dt} = \frac{1}{2} \rho A_r v^3 \qquad (2.2)$$

Cette équation montre pourquoi l'aérodynamique est si importante dans les systèmes éoliens. La puissance disponible augmente avec la surface balayée par le rotor et avec le cube de la vitesse du vent. Ainsi, une faible augmentation de la vitesse du vent peut accroître fortement la puissance disponible pour l'éolienne. Cependant, une éolienne ne peut pas extraire toute l'énergie du vent, car l'air doit continuer à se déplacer après avoir traversé le rotor. La fraction de la puissance du vent convertie en puissance utile au rotor est appelée coefficient de puissance, C_p :

$$C_p = \frac{P_{rotor}}{P_{wind}} \tag{2.3}$$

$$P_{rotor} = C_p \left(\frac{1}{2}\rho A_r v^3\right) \tag{2.4}$$

La conception aérodynamique des pales détermine la valeur de C_p. Les pales des éoliennes modernes ont la forme de profils aérodynamiques afin de générer de la portance et de réduire la traînée. La portance crée le couple nécessaire à la rotation du rotor, tandis que la traînée entraîne des pertes et des charges indésirables. Une bonne conception aérodynamique accroît donc la captation d'énergie, améliore le rendement, réduit les vibrations et le bruit et limite les charges structurelles sur les pales et la tour. L'aérodynamique détermine ainsi à la fois les performances et la fiabilité de l'ensemble du système éolien. Toutefois, la densité de puissance éolienne ne suffit pas à elle seule pour choisir un site d'implantation. Les ingénieurs doivent également prendre en compte l'intensité de la turbulence atmosphérique, le cisaillement du vent, la rugosité du terrain, les obstacles tels que les bâtiments et les arbres, l'accessibilité, le raccordement au réseau, l'impact environnemental et les conditions de chargement structurel. Un site peut par exemple présenter une vitesse moyenne élevée, mais si l'écoulement est fortement turbulent, les pales et la tour peuvent subir des charges de fatigue plus importantes. De même, un relief complexe peut accroître localement la vitesse du vent tout en provoquant un décollement de l'écoulement, des rafales et un écoulement non uniforme à travers le rotor.

Point technique 1

Du point de vue de l'ingénierie, l'équation (2.4) est utile car elle fournit une première estimation de la qualité de la ressource éolienne d'un site. La densité moyenne de puissance éolienne indique la quantité d'énergie du vent disponible par unité de surface avant prise en compte des pertes de l'éolienne. Elle constitue donc l'un des principaux paramètres utilisés lors de l'évaluation d'un site de parc éolien. En pratique, un site dont la densité moyenne de puissance éolienne est inférieure à 100 W/m² est généralement considéré comme peu favorable à l'installation d'éoliennes, car l'énergie disponible est trop faible pour justifier une production efficace. Un site d'environ 400 W/m² est considéré comme bon pour l'éolien, tandis qu'un site dépassant 700 W/m² est considéré comme excellent et très attractif pour le développement d'un parc éolien.

Ainsi, l'équation (2.4) constitue un point de départ important pour évaluer le potentiel éolien, mais le choix définitif d'un site exige une évaluation complète des aspects aérodynamiques, structurels, environnementaux et économiques.

1.1.2 Vitesses de fonctionnement et courbe de puissance de l'éolienne

La courbe de puissance d'une éolienne présentée à la figure 2.1 décrit la variation de la puissance électrique produite en fonction de la vitesse du vent. Du point de vue technique, cette courbe est très importante, car elle définit la plage de fonctionnement

sûre et efficace de l'éolienne. Une éolienne ne produit pas de puissance à toutes les vitesses du vent ; son fonctionnement est réparti entre plusieurs zones essentielles.

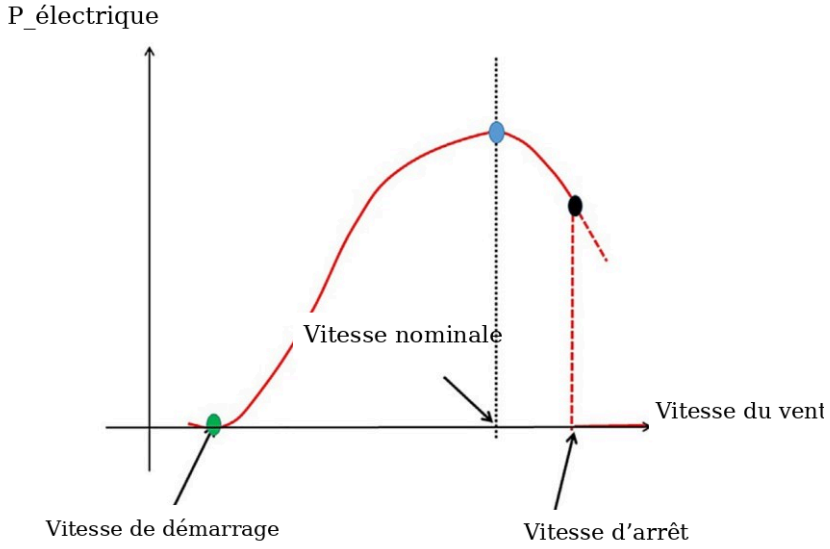


Figure 2.1 : Courbe type de puissance d'une éolienne avec les définitions des vitesses de démarrage, nominale et d'arrêt.

La vitesse de démarrage est la vitesse minimale du vent à laquelle l'éolienne commence à produire une puissance électrique utile. En dessous de cette vitesse, le vent ne contient pas suffisamment d'énergie cinétique pour vaincre les résistances mécaniques, satisfaire les exigences de la génératrice et franchir les limites du système de commande. Le rotor peut donc tourner lentement, mais aucune puissance significative n'est produite. Lorsque la vitesse du vent dépasse la vitesse de démarrage, la puissance produite augmente rapidement, car la puissance disponible dans le vent est proportionnelle au cube de sa vitesse. Dans cette zone, le système de commande de l'éolienne cherche à maximiser la captation d'énergie en maintenant un état aérodynamique efficace.

La vitesse nominale est la vitesse du vent à laquelle l'éolienne atteint sa puissance nominale. Cette puissance est la puissance continue maximale que la génératrice et la chaîne cinématique sont conçues pour fournir en toute sécurité. Au-dessus de cette vitesse, l'éolienne ne continue pas à augmenter indéfiniment sa puissance. Des systèmes de commande aérodynamique, comme la commande du pas des pales ou la régulation par décrochage, limitent au contraire la puissance extraite et protègent les composants mécaniques et électriques. La vitesse d'arrêt est la vitesse maximale du vent à laquelle l'éolienne est autorisée à fonctionner. Lorsque cette valeur est dépassée, l'éolienne est arrêtée par freinage ou par mise des pales en drapeau. Cette action évite des charges aérodynamiques, des vibrations et des dommages structurels excessifs sur les pales, la tour, le multiplicateur de vitesse et la génératrice.

La courbe de puissance n'est donc pas seulement une courbe de performance : c'est aussi un outil de sécurité et de conception. Elle montre comment l'aérodynamique, les systèmes de commande et les limites structurelles agissent conjointement pour produire efficacement de l'énergie tout en protégeant l'éolienne lorsque le vent est fort.

1.2 Types d'éoliennes

Les éoliennes peuvent être classées selon leur axe de rotation, la force motrice aérodynamique, la configuration du rotor, la vitesse de fonctionnement et la stratégie de commande. Bien que de nombreux concepts d'éoliennes aient été proposés, la plupart des éoliennes commerciales modernes reposent sur le même principe général : des pales en rotation convertissent la puissance du vent en puissance mécanique sur l'arbre, puis en puissance électrique. Les performances aérodynamiques d'une éolienne sont couramment décrites au moyen du coefficient de puissance C_p défini à l'équation (2.4) :

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho A_r v^3} \qquad (2.5)$$

La valeur de C_p indique l'efficacité avec laquelle l'éolienne convertit la puissance disponible dans le vent en puissance utile au rotor. Le rotor produit également un couple M = P/ ω, où M est le couple et ω la vitesse angulaire du rotor. Si la vitesse de rotation est exprimée en tours par minute (tr/min), alors :

$$\omega = \frac{\pi\, RPM}{30} \qquad (2.6)$$

Un autre paramètre adimensionnel important est le rapport de vitesse en bout de pale :

$$\lambda = \frac{v_{tip}}{v_{wind}} = \frac{\omega R_{tip}}{v_{wind}} \qquad (2.7)$$

où R_{tip} est le rayon jusqu'à l'extrémité de la pale. Le rapport de vitesse en bout de pale est important, car chaque type d'éolienne possède une plage de λ pour laquelle son rendement est maximal. Sur la carte de performances de la figure 2.2, les différents concepts d'éoliennes atteignent leur valeur maximale de C_p à des rapports de vitesse en bout de pale différents. Les rotors rapides fonctionnant principalement par portance opèrent généralement à des valeurs plus élevées de λ, tandis que les machines fonctionnant principalement par traînée opèrent à faible λ.

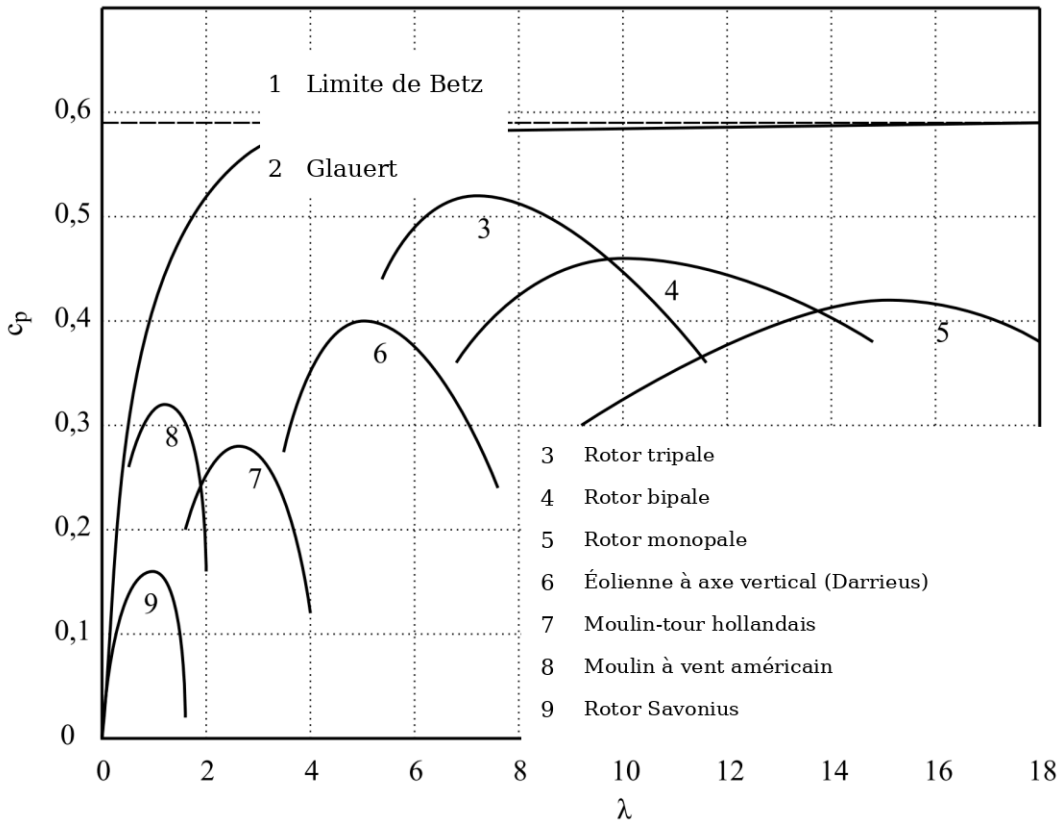


Figure 2.2 : Carte des éoliennes.

1.2.1 Éoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal (HAWT) constituent le modèle dominant dans l'énergie éolienne moderne. Dans ces machines, l'axe de rotation est approximativement horizontal et généralement aligné sur la direction du vent. L'évolution historique des HAWT peut être comprise en comparant les premières machines éoliennes aux rotors modernes.

Le moulin persan, présenté à la figure 2.3(a), est une ancienne machine à axe vertical entraînée par la traînée. Le moulin hollandais, présenté à la figure 2.3(b), a marqué une transition importante vers un axe de rotation horizontal. Il s'agissait d'une étape majeure de la technologie éolienne, car elle a permis au rotor d'interagir avec le vent de manière plus maîtrisée et plus efficace. Avec le temps, les machines éoliennes sont passées de dispositifs dominés par la traînée à des rotors fonctionnant par portance, beaucoup plus efficaces pour produire de l'électricité.



(a) (b)

Figure 2.3: Moulins à vent (a) persan et (b) hollandais.

Une HAWT moderne standard possède généralement trois pales, un rotor placé au vent, un fonctionnement à vitesse variable et une commande du pas des pales au-delà de la puissance nominale. La force motrice principale est la portance plutôt que la traînée. C'est pourquoi les pales des éoliennes modernes ont la forme de profils aérodynamiques (figure 2.4). La portance fournit la force tangentielle nécessaire à la rotation du rotor, tandis que la traînée produit principalement des pertes et des charges supplémentaires. Comme le montre la figure 2.4, la portance et la traînée sont les deux principales forces aérodynamiques agissant sur une pale d'éolienne en forme de profil aérodynamique. La portance agit approximativement perpendiculairement au vent relatif et résulte principalement de la différence de pression entre l'extrados et l'intrados de la pale. La traînée agit parallèlement au vent relatif et est causée par le frottement de surface et la résistance de pression. Dans les éoliennes modernes, la portance est la force recherchée, car elle contribue à la force tangentielle qui fait tourner le rotor et produit un couple utile. La traînée, en revanche, réduit le rendement aérodynamique et augmente les charges structurelles. La conception des pales vise donc à maximiser la portance tout en réduisant au minimum la traînée.

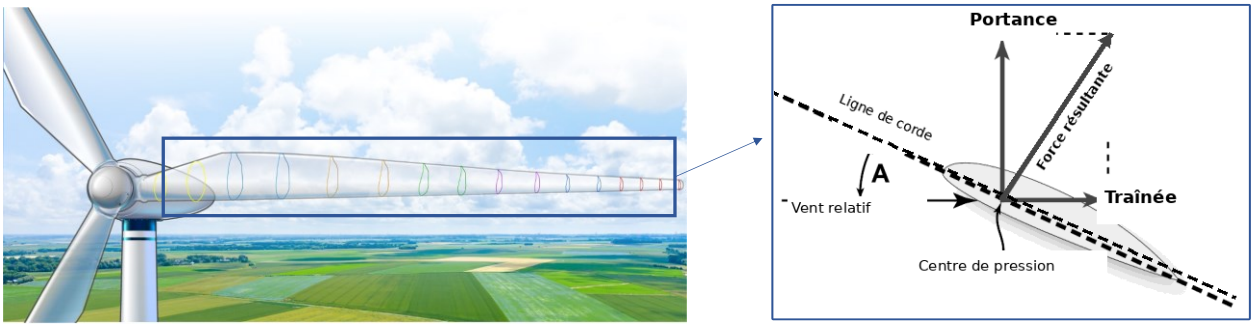


Figure 2.4 (vue de la pale): Forces de portance et de traînée sur des pales en forme de profil aérodynamique.

1.2.2 Petites éoliennes

Les petites éoliennes sont utilisées pour la production d'électricité locale, l'électrification rurale, la recharge des batteries et les petits systèmes d'énergie distribuée. Conformément à la définition dont il est question dans la source, une petite éolienne a une surface balayée par rotor ne dépassant pas 200 m2, ce qui correspond à un diamètre du rotor d'environ 16 m. Beaucoup de petites turbines sont beaucoup plus petites que cette limite, avec des diamètres du rotor à partir d'environ un mètre.

1.2.3 Éoliennes à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical (VAWT) tournent autour d'un axe vertical par rapport au sol. Le principal avantage de cette configuration est que l'éolienne n'a pas besoin de s'orienter face au vent. Elle peut accepter le vent provenant de toute direction horizontale, ce qui est intéressant sur les sites où la direction du vent change fréquemment. La figure 2.5 présente les principaux types de VAWT.

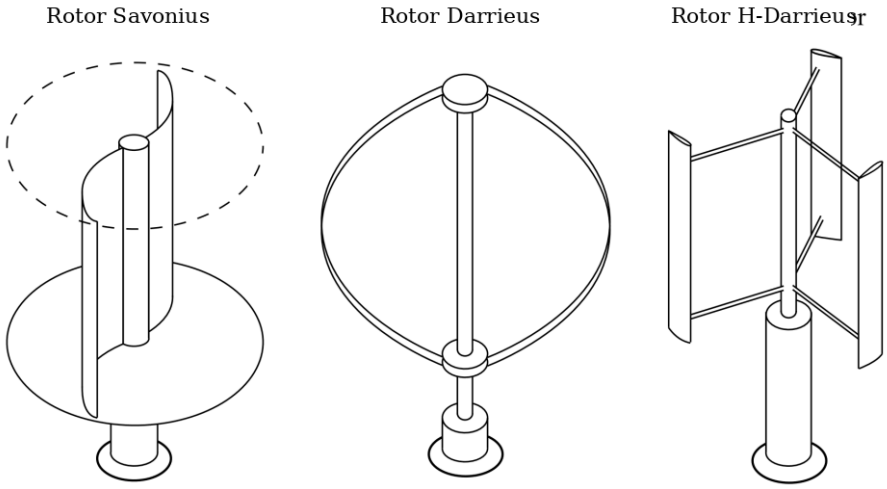


Figure 2.5: Types d'éoliennes à axe vertical.

Comme on peut le constater, le rotor Savonius est principalement entraîné par la traînée et présente une géométrie simple, mais son rendement est relativement faible ; voir la figure 2.2. Les modèles Darrieus et H-Darrieus fonctionnent principalement par portance et peuvent atteindre de meilleures performances aérodynamiques.

Du point de vue mécanique, les VAWT présentent un autre avantage : les composants lourds, comme la génératrice et le multiplicateur de vitesse, peuvent être installés plus près du sol. Cela peut simplifier la maintenance et réduire la masse au sommet de la tour. Toutefois, l'aérodynamique des VAWT est plus complexe que celle des HAWT. À chaque rotation, les pales subissent des variations continues de l'angle d'attaque, un décrochage dynamique et des interactions avec le sillage. Les charges aérodynamiques fluctuent donc fortement, ce qui peut accroître les dommages par fatigue, en particulier à proximité des articulations des pales et des liaisons de support.

2 Incidence de l'aérodynamique sur la conception des pales

2.1 Pourquoi les pales se déplacent-elles?

Deux raisons importantes expliquent pourquoi les pales d'une éolienne peuvent tourner sous l'action du vent : la troisième loi de Newton et l'effet de Bernoulli.

- Troisième loi de Newton. À toute action correspond une réaction égale et opposée. Dans le cas d'une pale d'éolienne, l'action du vent qui pousse l'air contre la pale provoque en réaction la déviation, ou la poussée, de cette pale. Si la pale n'a aucun pas, c'est-à-dire aucun angle, elle est simplement poussée vers l'arrière, dans le sens du vent. Comme les pales d'éolienne sont toutefois réglées selon un angle, le vent est dévié dans une direction opposée et repousse les pales loin du flux dévié. Ce phénomène peut être observé sur une simple pale plane placée selon un angle. Si vous poussez la pale avec le doigt dans la direction du vent incident, elle s'écarte de votre doigt.
- Principe ou effet de Bernoulli. L'air qui se déplace plus vite présente une pression plus faible. Les pales d'éolienne sont profilées de telle sorte que les molécules d'air qui contournent la pale se déplacent plus rapidement du côté sous le vent que celles qui passent du côté au vent (voir figure 2.6). Cette forme, appelée profil aérodynamique, ressemble à une goutte d'eau asymétrique. Le côté sous le vent de la pale est fortement incurvé, alors que le côté au vent est relativement plat. Comme l'air se déplace plus rapidement sur le côté incurvé, sous le vent, la pression y est plus faible. Cette différence de pression entre les deux faces de la pale « soulève » celle-ci vers la courbure du profil aérodynamique.

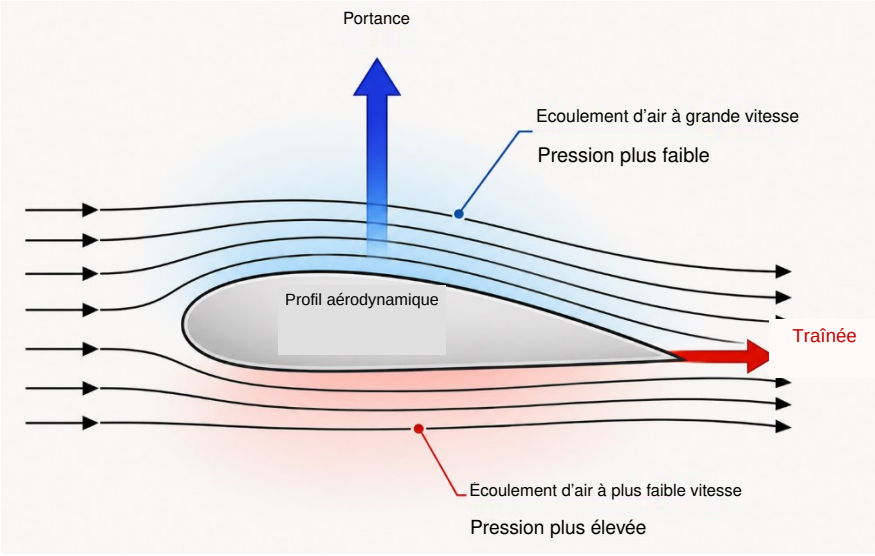


Figure 2.6: Coupe d'une pale en forme de profil aérodynamique et effet du vent.

2.2 Tâche de conception des pales

Après avoir présenté les connaissances sur le mouvement des pales et les principes aérodynamiques fondamentaux, il convient de donner une vue d'ensemble de ce qui est réellement mis en œuvre dans la conception pratique des pales d'éoliennes. Avec le développement d'immenses éoliennes en mer dont le rotor dépasse 230 mètres de diamètre et dont la puissance nominale atteint 16 mégawatts, ainsi qu'avec des projets d'éoliennes de 50 mégawatts ayant un rotor de 500 mètres de diamètre et des pales dont la masse estimée est de 400 tonnes, la conception des pales est devenue de plus en plus complexe[1].

La conception d'une véritable pale d'éolienne commerciale est un processus complexe qui fait intervenir au moins trois domaines essentiels : l'aérodynamique ; la conception structurelle ; la fabrication. L'aérodynamique ne concerne que la peau extérieure de la pale et donne une indication de la forme requise. La fabrication dépend fortement de la conception structurelle, puisque celle-ci détermine en grande partie la quantité de matériau utilisée. Cette quantité détermine à son tour la masse de la pale, laquelle est reliée à d'autres facteurs de performance par les règles de l'ingénierie.

2.2.1 Effet aérodynamique

La conception aérodynamique d'une pale consiste à lui donner une forme permettant d'extraire une puissance élevée du vent tout en maintenant les charges aérodynamiques dans des limites structurelles acceptables. La conception d'une pale est donc un problème d'ingénierie couplé faisant intervenir l'aérodynamique, la conception structurelle et la fabrication. L'aérodynamique définit principalement la forme extérieure de la pale, tandis que la conception structurelle détermine si cette forme pourra résister aux charges de fatigue et aux charges extrêmes pendant toute la durée de vie de l'éolienne. La longueur de pale fixe la première dimension principale ; la corde c est liée à la circulation aérodynamique et à la portance ; l'épaisseur restante et la structure interne sont ensuite déterminées par les exigences de résistance et de rigidité.

Le principe de production de puissance à partir du vent a été décrit par l'équation (2.5), et le rapport de vitesse en bout de pale par l'équation (2.7) ; ces relations montrent l'influence de la conception des pales sur la production de puissance et sont illustrées à la figure 2.2. Dans la formulation BEM (théorie combinée de l'élément de pale et de la quantité de mouvement), la pale est divisée en éléments radiaux et les forces aérodynamiques de chaque section de profil sont mises en équilibre avec la théorie de la quantité de mouvement. Les coefficients des forces normale et tangentielle sont :

$$c_N = \qquad (2.8)$$

NN. Upwind - limites de conception et solutions pour les très grandes éoliennes. Rapport technique, EAWE, 2011. 2011 Bruxelles, Belgique

$$c_{tan} = c_L\text{-c} \qquad \text{pour} \qquad (2.9)$$

où c_L et c_D sont les coefficients de portance et de traînée (voir figure 2.6), et φ l'angle local d'écoulement. Ces deux équations sont essentielles à la conception des pales. La composante normale c_N contribue principalement à la poussée et au chargement de la pale dans le plan de battement, tandis que la composante tangentielle c_{tan} produit le couple utile. Une bonne conception recherche donc une force tangentielle élevée tout en maîtrisant la force normale, car une charge normale excessive accroît la masse de la pale, les dommages de fatigue et les charges sur la tour. Les facteurs d'induction aérodynamique sont ensuite obtenus à partir des équations BEM :

$$a = \frac{1}{\frac{4\ \text{po}\ ^2(\phi)}{\sigma c_N} + 1} \qquad (2.10)$$

$$a' = \frac{1}{\frac{4\sin(\lambda)\cos(\lambda)}{\sigma c_{\ n}} - 1} \qquad (2.11)$$

où a est le facteur d'induction axiale, a' le facteur d'induction tangentielle et σ = Bc/(2πr) la solidité locale. Ici, B est le nombre de pales, c la corde locale et r la position radiale. Ces relations expliquent pourquoi la distribution de corde est une variable de conception : modifier c modifie la solidité σ, ce qui modifie les facteurs d'induction et donc le chargement aérodynamique local. Dans la conception pratique d'une pale, ces équations sont résolues de manière itérative, car les coefficients aérodynamiques, l'angle d'écoulement, les facteurs d'induction et la géométrie de la pale sont interdépendants.

À titre d'exemple, la figure 2.7 montre comment la modification de la distribution de corde influence le comportement aérodynamique de la pale section par section. La figure 2.7-a présente trois distributions supposées : corde réduite, cas de référence et corde augmentée. La solidité étant définie par σ = Bc/(2πr), une augmentation de la corde c accroît directement la solidité locale, comme le montre la figure 2.7-b. Cet effet est le plus marqué près de l'emplanture, où le rayon r est faible et où le rapport c/r devient élevé. La géométrie de la pale exerce donc une forte influence sur l'écoulement local. L'effet de la variation de corde apparaît ensuite dans les facteurs d'induction. La figure 2.7-c montre que le cas à corde plus grande produit un facteur d'induction axiale a plus élevé, ce qui signifie que le rotor extrait davantage de quantité de mouvement axiale de l'écoulement incident. La figure 2.7-d montre le facteur d'induction tangentielle a', lui aussi plus fortement influencé dans la zone intérieure de la pale. Ces courbes montrent que les facteurs d'induction ne sont pas des données fixes : ils varient avec la géométrie, la solidité, les coefficients aérodynamiques et l'angle local d'écoulement.

La poussée est la force aérodynamique qui agit sur le rotor dans la direction du vent lorsque les pales extraient de l'énergie et ralentissent l'écoulement. Elle agit principalement perpendiculairement au plan du rotor et est étroitement liée au coefficient de force normale c_N. Le chargement dans le plan de battement correspond à la flexion de chaque pale sous l'effet de cette poussée, la pale se courbant vers l'aval, à l'opposé du vent incident. Ce chargement est important pour la conception, car il crée de forts moments de flexion à l'emplanture et influence fortement la résistance, la durée de vie en fatigue et la garde par rapport à la tour.

Ces diagrammes montrent que les facteurs d'induction ne sont pas des données fixes : ils varient avec la géométrie de la pale, la solidité, les coefficients aérodynamiques et l'angle local d'écoulement. Enfin, les figures 2.7-e et 2.7-f illustrent la conséquence technique de ce couplage aérodynamique. L'augmentation de la corde accroît la charge normale, associée à la poussée et aux charges de flexion dans le plan de battement (figure 2.7-e). Elle accroît simultanément la charge tangentielle, qui contribue à la production de couple utile (figure 2.7-f). Une corde plus grande peut donc améliorer la production de couple, mais elle augmente aussi les sollicitations structurelles de la pale. La distribution de corde est donc une variable clé de conception : elle doit équilibrer la captation de puissance aérodynamique avec la masse de la pale, les charges de fatigue, les charges sur la tour et la sécurité structurelle.

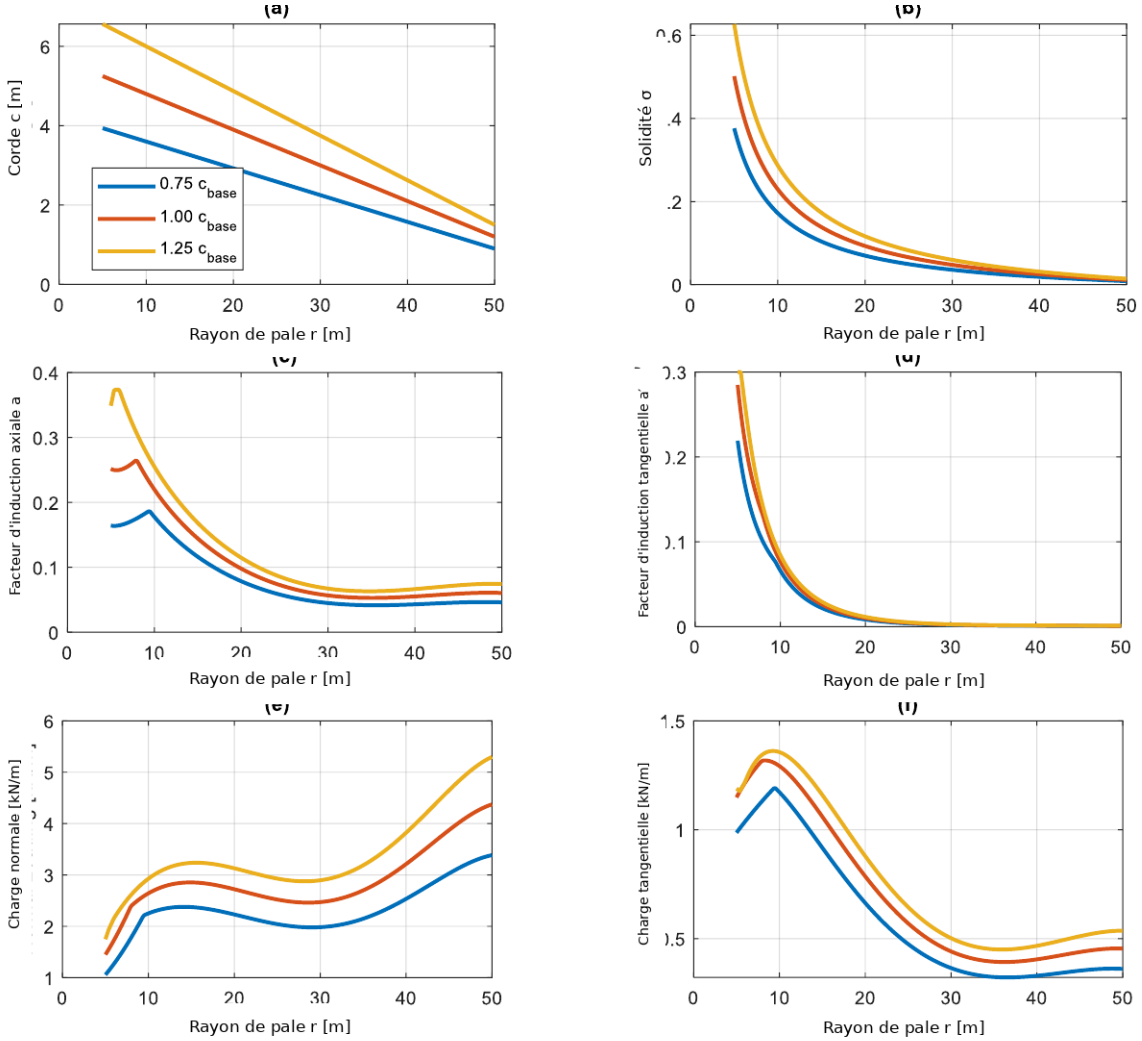


Figure 2.7 : Effet de la distribution de la corde sur la solidité, les facteurs d'induction et le chargement aérodynamique le long de la pale : (a) distributions de corde pour 0,75 c_{base}, 1,00 c_{base} et 1,25 c_{base} ; (b) solidité correspondante σ, montrant sa dépendance directe à la corde et au rayon ; (c) facteur d'induction axiale *a*, représentant la réduction de la vitesse axiale du vent par extraction d'énergie ; (d) facteur d'induction tangentielle *a′*, représentant l'effet de rotation induit dans l'écoulement ; (e) chargement aérodynamique normal, principalement associé à la poussée et à la flexion de la pale dans le plan de battement ; et (f) chargement aérodynamique tangentiel, associé à la production de couple utile et de puissance.

Le vrillage de pale est choisi de sorte que chaque section radiale fonctionne près d'un angle d'attaque efficace. On adopte la convention $\alpha = \varphi - \vartheta$, où α est l'angle d'attaque, φ l'angle d'écoulement et ϑ l'angle de vrillage, le pas s'ajoutant au vrillage. Cette relation explique pourquoi les pales d'éolienne sont vrillées sur toute leur longueur. Près de l'emplanture, la vitesse de rotation locale est plus faible et l'angle d'écoulement plus grand ; un vrillage plus important est donc nécessaire. Près de l'extrémité, la vitesse de rotation est plus élevée et l'angle d'écoulement diminue, de sorte que le vrillage requis est plus faible. Comme l'illustre la figure 2.8-a, l'angle d'écoulement φ est très grand près de l'emplanture, car la vitesse tangentielle locale y est encore faible. À mesure que le rayon augmente vers l'extrémité de la pale, la vitesse tangentielle devient beaucoup plus grande ; la direction du vent relatif s'aligne davantage sur le plan du rotor et φ diminue. Le vrillage requis ϑ est donc élevé près de l'emplanture et décroît progressivement vers l'extrémité. Cette distribution est choisie de façon à maintenir l'angle d'attaque local proche de la valeur de conception efficace, α_{design}. La figure 2.8-b montre clairement cet effet : sans vrillage, l'angle d'attaque varie fortement le long de la pale, ce qui peut dégrader la portance ou provoquer un décrochage près de l'emplanture. Avec le vrillage requis, l'angle d'attaque reste presque constant à la valeur de conception, ce qui permet aux sections de pale de fonctionner plus efficacement sur toute leur longueur.

L'angle d'attaque est l'angle entre la ligne de corde du profil aérodynamique et le vent relatif arrivant sur la pale. Dans une pale d'éolienne, il dépend de la vitesse du vent incident, de la vitesse de rotation de la pale, de l'angle de vrillage et de l'angle de pas. Il est important car il détermine la portance et la traînée générées par la section de pale. À un angle d'attaque approprié, la pale produit une forte portance pour une faible traînée et donc un couple efficace. Si l'angle devient trop grand, l'écoulement peut se décoller de la surface, ce qui provoque le décrochage, réduit la portance, accroît la traînée et augmente les charges instationnaires.

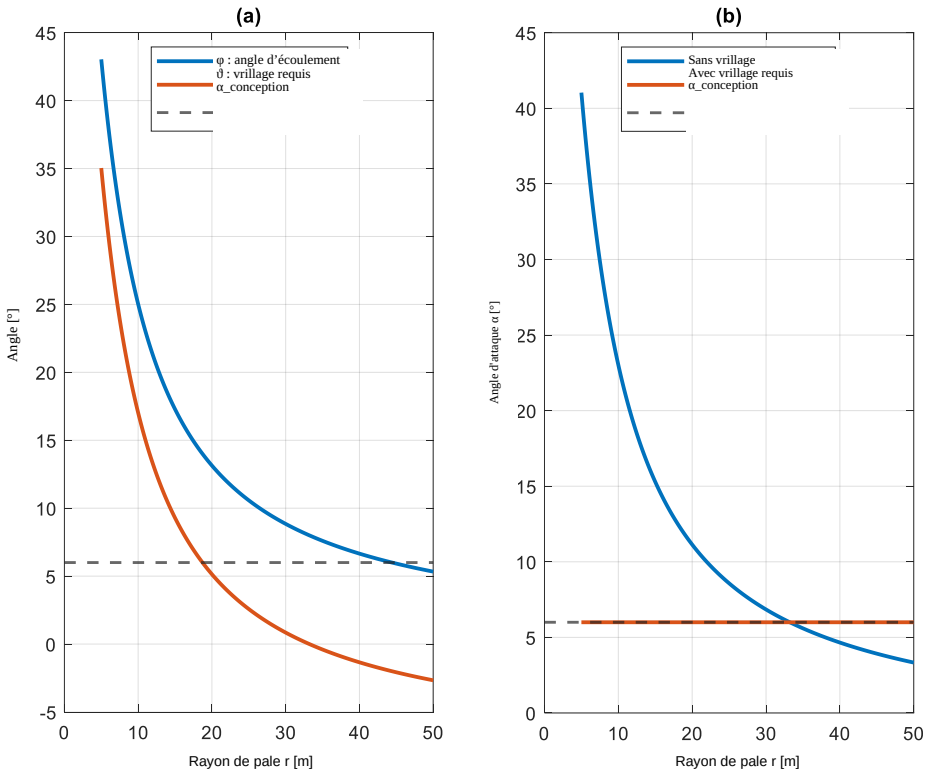


Figure 2.8 : Effet du vrillage de la pale sur les angles aérodynamiques locaux : (a) variation de l'angle d'écoulement φ, de l'angle de vrillage requis ϑ et de l'angle d'attaque de conception $\alpha_{conception}$ le long du rayon de pale ; (b) comparaison de la distribution de l'angle d'attaque avec et sans vrillage, montrant que le vrillage requis maintient α presque constant et proche de la valeur de conception choisie.

Point technique 2

Le choix du profil aérodynamique constitue un autre aspect majeur de la conception aérodynamique des pales. Le profil est choisi après détermination de la longueur de pale, du coefficient de portance c_L et de la corde c. Pour réduire les pertes, le rapport portance/traînée doit être aussi élevé que possible, mais le coefficient de portance maximal $c_{L,max}$ doit être maîtrisé, car une forte portance s'accompagne de forces aérodynamiques importantes. Le meilleur profil n'est donc pas simplement celui qui génère la plus grande portance, mais celui qui offre un compromis approprié entre portance, traînée, comportement au décrochage, épaisseur, sensibilité à la rugosité et exigences structurelles.

2.2.2 Dispositifs aérodynamiques

Les dispositifs aérodynamiques sont de petits composants de contrôle de l'écoulement ajoutés aux pales afin d'améliorer ou d'ajuster leurs performances. Les générateurs de vortex, les volets Gurney, les dispositifs de bord de fuite et, parfois, les modifications du bord d'attaque en sont des exemples courants. Leur objectif principal est de maîtriser la couche limite, de retarder le décollement de l'écoulement, d'augmenter la portance ou de réduire les pertes aérodynamiques. Par exemple, les générateurs de vortex présentés à la figure 2.9 créent de petits tourbillons énergétiques qui mélangent l'écoulement externe à forte quantité de mouvement avec l'écoulement plus lent de la couche limite proche de la surface de la pale, ce qui aide l'écoulement à

rester attaché à des angles d'attaque plus élevés. Les volets Gurney (figure 2.9) sont de petites languettes placées près du bord de fuite ; ils peuvent augmenter la portance en modifiant la distribution de pression autour du profil. Ces dispositifs sont particulièrement utiles près de l'emplanture ou sur les sections de profil épaisses, où le décollement est plus probable. Ils peuvent cependant accroître la traînée et le bruit et doivent donc être employés avec prudence. Dans la conception des pales, les dispositifs aérodynamiques servent principalement à améliorer la captation de puissance, à stabiliser le comportement au décrochage, à réduire la sensibilité à la rugosité et à ajuster la charge locale sans modifier entièrement la géométrie de la pale.

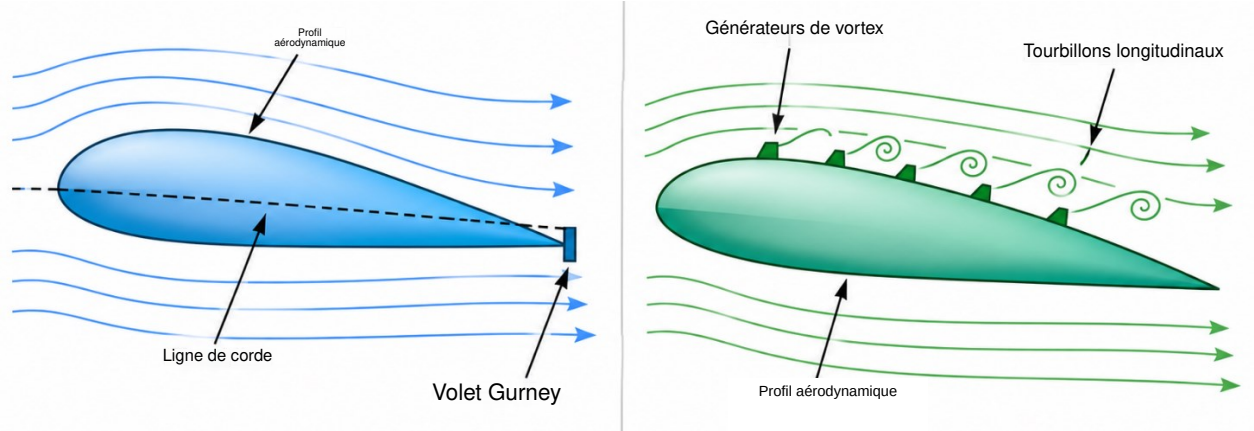


Figure 2.9 : Emplacement des générateurs de vortex et des volets Gurney, et effet sur leurs performances.

Fabrication

Les pales d'éoliennes sont généralement fabriquées en matériaux composites renforcés de fibres de verre ou de carbone, car ces matériaux offrent une résistance élevée pour une masse relativement faible. Une pale type est constituée de deux grandes coques moulées, habituellement une moitié supérieure et une moitié inférieure, qui sont ensuite collées pour former le profil aérodynamique final. À l'intérieur de la pale, des éléments structurels comme les semelles de longeron et les âmes de cisaillement sont ajoutés pour reprendre les charges de flexion et maintenir la rigidité. Le processus de fabrication doit être très précis, car de petits défauts de surface, un collage incorrect ou des écarts de forme peuvent affecter à la fois les performances aérodynamiques et la sécurité structurelle. À mesure que la longueur des pales augmente, leur fabrication devient plus difficile en raison de moules plus grands, de composants plus lourds, d'un contrôle qualité plus strict et de contraintes de transport. La production moderne de pales cherche donc à réduire les coûts, à améliorer la répétabilité, à automatiser les opérations essentielles et à utiliser les matériaux efficacement, tout en maintenant la durée de vie en fatigue et la fiabilité requises.

3 Résumé de la séance

Le principal enseignement de cette séance est que les performances d'une éolienne sont fondamentalement déterminées par l'aérodynamique. La puissance du vent dépend fortement de la vitesse du vent, de la surface balayée par le rotor et de la masse volumique de l'air, mais la conception des pales détermine la part de cette énergie disponible qui peut effectivement être convertie en couple utile. La portance est la force recherchée, car elle entraîne la rotation, tandis que la traînée et une charge normale excessive réduisent le rendement et augmentent les sollicitations structurelles. La conception efficace d'une éolienne repose donc toujours sur un équilibre entre la maximisation de la captation d'énergie et la limitation des charges, des vibrations, de la fatigue et des risques pour la sécurité.

Un second enseignement essentiel est que la géométrie de la pale n'est pas arbitraire : la corde, le vrillage, la forme du profil aérodynamique et les dispositifs aérodynamiques sont tous choisis afin de maîtriser le comportement local de l'écoulement le long de la pale. La modification de la corde influe sur la solidité, les facteurs d'induction et les charges normale et tangentielle, tandis que le vrillage maintient l'angle d'attaque près d'une valeur de conception efficace de l'emplanture à l'extrémité. Les dispositifs aérodynamiques comme les générateurs de vortex et les volets Gurney peuvent améliorer l'attachement de l'écoulement et la portance, mais ils doivent être employés avec prudence, car ils peuvent aussi accroître la traînée ou le bruit. Globalement, la conception d'une pale d'éolienne constitue un compromis aérostructurel entre la production de puissance, l'aptitude à la fabrication, la durabilité et la fiabilité à long terme.

Structure mécanique et mécanismes des éoliennes — Partie I

Objectifs d'apprentissage

- Identifier les principaux composants mécaniques d'une éolienne, notamment le rotor, la nacelle, la chaîne cinématique, la tour, le moyeu, l'arbre, le multiplicateur de vitesse, les roulements et le système de freinage.
- Expliquer la fonction des principaux sous-systèmes mécaniques et décrire leurs interactions pour transformer l'énergie du vent en mouvement de rotation.
- Décrire la configuration mécanique fondamentale d'une éolienne à axe horizontal, depuis l'ensemble rotor jusqu'à l'interface de la génératrice.
- Analyser la transmission des charges mécaniques à travers la structure de l'éolienne, depuis les pales et le moyeu jusqu'à l'arbre, la nacelle, la tour et la fondation.
- Reconnaître les principales considérations de conception des systèmes mécaniques d'une éolienne, notamment la résistance, la tenue à la fatigue, la maîtrise des vibrations, la protection contre la corrosion, la sécurité, la fiabilité et l'accès pour la maintenance.

Résumé

Ce cours présente les principales structures et les principaux mécanismes mécaniques utilisés dans les éoliennes, en insistant sur la manière dont les composants essentiels fonctionnent ensemble pour convertir l'énergie du vent en mouvement mécanique de rotation. Les apprenants étudieront le rotor, les pales, le moyeu, la nacelle, la chaîne cinématique, l'arbre principal, les roulements, le multiplicateur de vitesse, le système de freinage, le système d'orientation en lacet, la tour et les structures de support. Le cours explique également la configuration mécanique d'une éolienne à axe horizontal, le chemin de transmission des charges depuis les pales jusqu'à la fondation, ainsi que l'importance de la résistance, de la tenue à la fatigue, de la fiabilité, de la maintenabilité et de la sécurité dans la conception. À la fin de la séance, les apprenants comprendront comment les composants mécaniques contribuent au fonctionnement, aux performances et à la durabilité à long terme de l'éolienne.

1 Introduction aux systèmes mécaniques des éoliennes

Les systèmes mécaniques constituent l'ossature physique d'une éolienne. Ils sont chargés de capter la force du vent, de la convertir en mouvement de rotation, de soutenir la structure et de protéger la machine dans des conditions de fonctionnement normales et extrêmes. Les principales parties mécaniques comprennent le rotor, les pales, le moyeu, la nacelle, la chaîne cinématique, l'arbre principal, les roulements, le multiplicateur de vitesse, le système de freinage, le système d'orientation en lacet, la tour et l'interface avec la fondation. Bien que chaque composant remplisse une fonction particulière, tous doivent fonctionner comme un système intégré. Par exemple, les pales captent l'énergie aérodynamique du vent, le moyeu transmet ce mouvement à l'arbre, la chaîne cinématique transmet le couple vers la génératrice et la tour maintient l'ensemble nacelle-rotor à la hauteur requise.

La compréhension des systèmes mécaniques est importante, car les performances mécaniques influencent directement la production d'énergie, la sécurité, la fiabilité et les coûts de maintenance. Les éoliennes fonctionnent dans des conditions de vent en perpétuelle évolution qui imposent aux composants des charges dynamiques, des vibrations, de la fatigue et des contraintes. La conception des systèmes mécaniques doit donc prendre en compte la résistance, la durabilité, la réduction des frottements, la protection contre la corrosion, la facilité de maintenance et la sécurité de fonctionnement. Une structure mécanique bien conçue permet à l'éolienne de fonctionner efficacement pendant de nombreuses années tout en réduisant le risque de défaillance des composants. Cette section présente la structure et la fonction fondamentales des composants mécaniques et prépare les apprenants à aborder des sujets plus avancés, comme le comportement de la chaîne cinématique, la transmission des charges, les mécanismes d'orientation en lacet, les systèmes de freinage et la planification de la maintenance.

1.1 Vue d'ensemble de la structure d'une éolienne

Les systèmes mécaniques constituent l'ossature physique d'une éolienne. Ils sont chargés de capter la force du vent, de la convertir en mouvement de rotation, de soutenir la structure et de protéger la machine dans des conditions de fonctionnement normales et extrêmes. Les principales parties mécaniques, présentées à la figure 3.1, comprennent le rotor, les pales, le moyeu, la nacelle, la chaîne cinématique, l'arbre principal, les roulements, le multiplicateur de vitesse, le système de freinage, le système d'orientation en lacet, la tour et l'interface avec la fondation. Bien que chaque composant remplisse une fonction particulière, tous doivent fonctionner comme un système intégré. Par exemple, les pales captent l'énergie aérodynamique du vent, le moyeu transmet ce mouvement à l'arbre, la chaîne cinématique transmet le couple vers la génératrice et la tour maintient l'ensemble nacelle-rotor à la hauteur requise.



Figure 3.1: Vue d'ensemble des principaux composants mécaniques d'une éolienne.

La compréhension des systèmes mécaniques est importante, car les performances mécaniques influencent directement la production d'énergie, la sécurité, la fiabilité et les coûts de maintenance. Les éoliennes fonctionnent dans des conditions de vent en perpétuelle évolution qui imposent aux composants des charges dynamiques, des vibrations, de la fatigue et des contraintes. La conception des systèmes mécaniques doit donc prendre en compte la résistance, la durabilité, la réduction des frottements, la protection contre la corrosion, la facilité de maintenance et la sécurité de fonctionnement. Une structure mécanique bien conçue permet à l'éolienne de fonctionner efficacement pendant de nombreuses années tout en réduisant le risque de défaillance des composants. Cette section présente la structure et la fonction fondamentales des composants mécaniques et prépare les apprenants à aborder des sujets plus avancés, comme le comportement de la chaîne cinématique, la transmission des charges, les mécanismes d'orientation en lacet, les systèmes de freinage et la planification de la maintenance.

1.2 Relation entre les systèmes aérodynamiques, mécaniques et électriques

La relation entre les systèmes aérodynamiques, mécaniques et électriques d'une éolienne repose sur un processus continu de conversion de l'énergie. Le système aérodynamique capte l'énergie du vent au moyen des pales ; les forces de portance ainsi créées font tourner le rotor et le moyeu. Ce mouvement de rotation est transmis au système mécanique par l'arbre principal, les roulements, le multiplicateur de vitesse ou la liaison à entraînement direct, les accouplements, le système de freinage et la structure porteuse de la nacelle. Le système mécanique fournit ensuite à la génératrice un couple de rotation maîtrisé ; le système électrique convertit alors l'énergie mécanique en puissance électrique destinée au réseau ou à une charge locale. En exploitation réelle, ces trois systèmes

s'influencent fortement. Les variations de la vitesse ou de la direction du vent font varier la charge sur les pales, la vitesse du rotor, les vibrations et le couple. Ces variations se transmettent à travers la chaîne cinématique et peuvent influer sur l'usure du multiplicateur, la température des roulements, l'alignement de l'arbre et les charges de freinage. Dans le même temps, la génératrice et l'électronique de puissance appliquent un couple électrique en réaction sur la chaîne cinématique, ce qui influe sur l'accélération du rotor et les contraintes mécaniques. La fiabilité du fonctionnement dépend donc d'un équilibre approprié entre la captation aérodynamique de l'énergie, la transmission mécanique du couple et la conversion de la puissance électrique. Note technique 1

L'expérience de terrain montre que de nombreux défauts d'éoliennes résultent d'interactions entre *plusieurs systèmes plutôt que de problèmes isolés. Par exemple, un défaut d'alignement en lacet ou un pas de pale incorrect peut réduire le rendement aérodynamique et créer des charges mécaniques inégales sur le moyeu, les roulements, la tour et la chaîne cinématique. Une mauvaise lubrification ou l'usure du multiplicateur de vitesse peut accroître les vibrations et dégrader la transmission régulière du couple à la génératrice. Des problèmes électriques, comme un couple instable de la génératrice, des défauts du convertisseur ou des perturbations du réseau, peuvent également provoquer des vibrations torsionnelles et des contraintes mécaniques supplémentaires. Lorsqu'ils diagnostiquent les performances d'une éolienne, les techniciens doivent donc examiner conjointement la vitesse du vent, la vitesse du rotor, l'angle de pas, la position en lacet, les vibrations, la température, le couple et la puissance électrique produite.*

---

2 Principales parties structurelles d'une éolienne

Les principales parties structurelles d'une éolienne constituent la base nécessaire pour comprendre l'organisation et le support de l'ensemble de la machine. Une éolienne moderne n'est pas un composant unique, mais l'association de grandes parties mécaniques qui captent ensemble l'énergie du vent, transmettent les charges, protègent les équipements internes et garantissent un fonctionnement sûr. Ces parties principales comprennent le rotor, la nacelle, la tour et l'interface avec la fondation. Chacune joue un rôle structurel précis et est également reliée à d'autres systèmes mécaniques, électriques et de commande de l'éolienne. La compréhension de ces parties structurelles aide les apprenants à voir comment les forces se propagent à travers l'éolienne en fonctionnement. Le rotor capte l'énergie du vent et transmet les charges aérodynamiques au moyeu et à la chaîne cinématique. La nacelle abrite et soutient des composants mécaniques et électriques importants, tels que l'arbre, le multiplicateur, la génératrice, le frein et les équipements de commande. La tour porte la nacelle et le rotor à la hauteur requise tout en résistant à la flexion, aux vibrations et aux charges environnementales. Enfin, l'interface avec la fondation transmet en toute sécurité l'ensemble des charges de l'éolienne au sol ou à la plateforme de support. Cette section fournit le cadre de base nécessaire à l'étude des composants, des chemins de charge, de la conception mécanique et des exigences de maintenance.

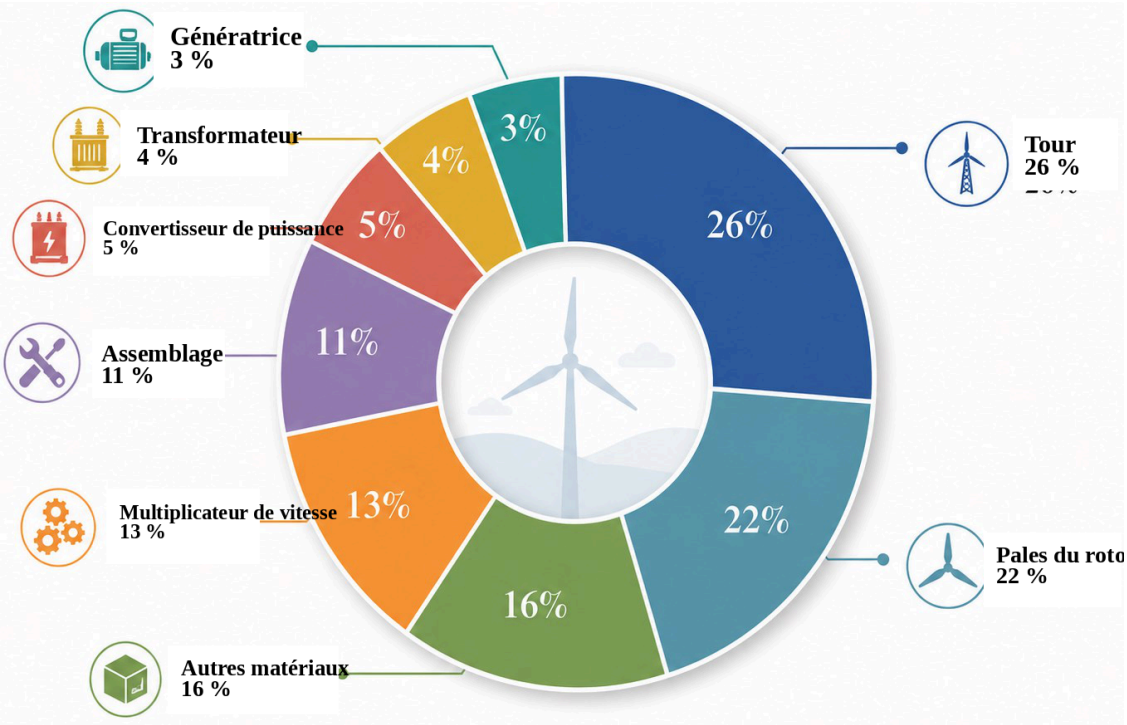


Figure 3.2: Répartition du coût d'une éolienne.

2.1 Rotor

Le rotor est l'une des parties structurelles et mécaniques les plus importantes d'une éolienne, car il est le premier élément à interagir avec le vent. Il se compose généralement des pales, du moyeu et du système de liaison des pales (voir figure 3.3). Sa fonction principale consiste à capter l'énergie cinétique de l'air en mouvement et à la convertir en énergie mécanique de rotation. Lorsque le vent s'écoule autour des pales, des forces aérodynamiques de portance sont produites et font tourner le rotor autour de son axe central. Ce mouvement est ensuite transmis par le moyeu à l'arbre principal et à la chaîne cinématique, puis à la génératrice pour produire de l'électricité.

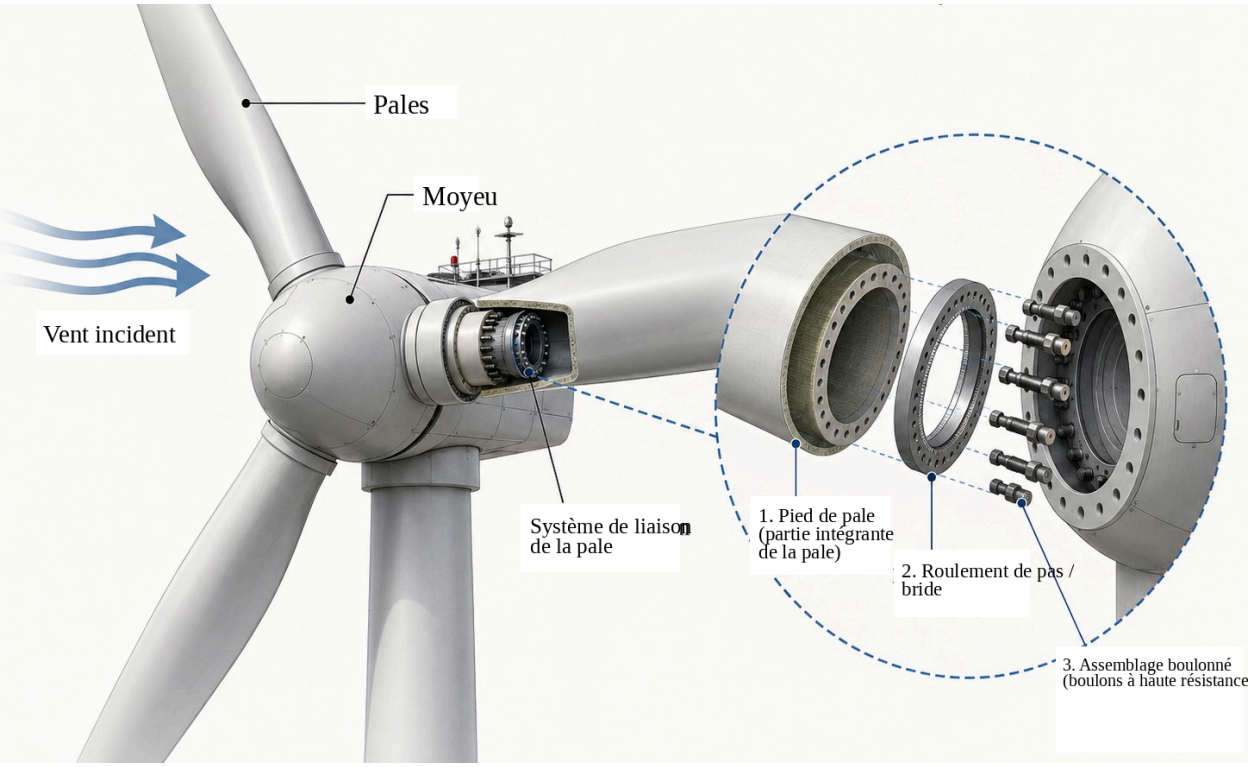


Figure 3.3: Principaux composants du rotor d'une éolienne.

Comme le montre la figure 3.3, le moyeu est essentiellement le point de liaison des pales. Les moyeux sont généralement en acier ou en fonte à graphite sphéroïdal et sont protégés extérieurement par une enveloppe de forme ovale appelée cône de nez. Il existe trois principaux types de moyeux (figure 3.4) :

- rigide ;
- à balancier ;
- articulé.

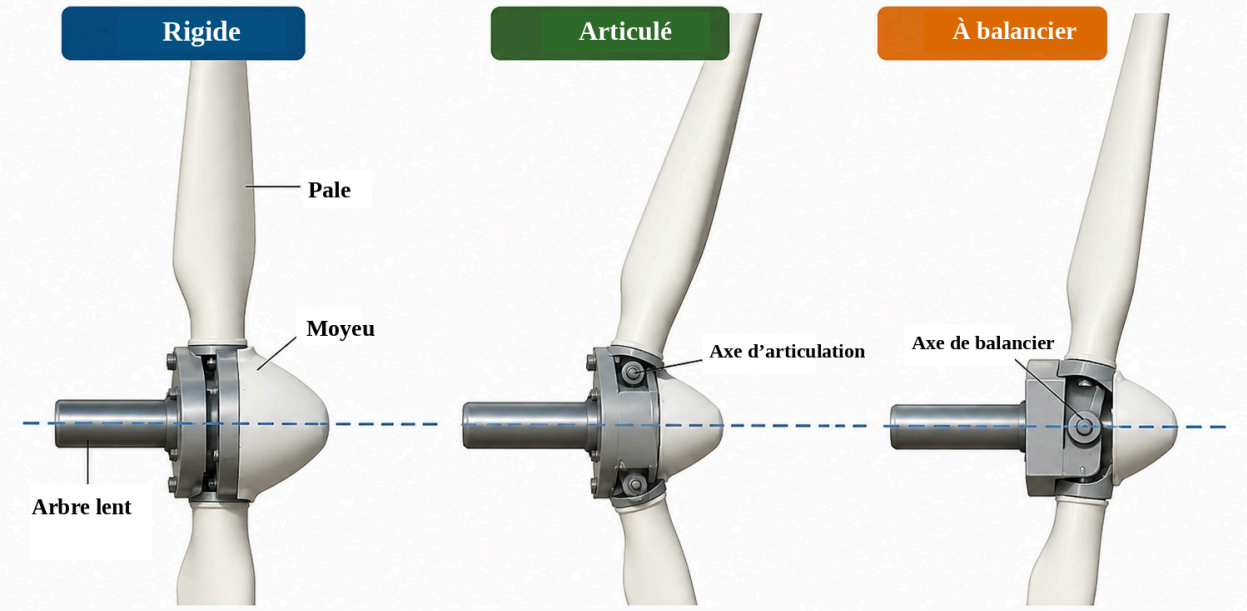


Figure 3.4: Types de liaisons à l'emplanture des pales.

Chaque type de liaison pale-moyeu présente des avantages, des inconvénients et des applications propres, résumés dans le tableau 3.1.

Tableau 3.1: Applications, avantages et inconvénients des différentes liaisons à l'emplanture des pales.

Type de liaison moyeu-emplanture	Applications types	Avantages	Inconvénients
Moyeu rigide	Courant sur les éoliennes modernes à axe horizontal et à trois pales, surtout les éoliennes de grande puissance. Utilisé lorsque sont exigés une grande rigidité, une commande précise des pales et une production stable.	Assure une liaison structurelle robuste entre l'emplanture et le moyeu. Procure une bonne stabilité du rotor et une transmission précise du couple à l'arbre lent. Convient aux grandes éoliennes équipées d'une commande du pas. Présente un comportement dynamique plus simple que les moyeux articulés ou à balancier. Permet une bonne maîtrise de la position des pales en fonctionnement normal et lors d'un arrêt d'urgence.	Transmet davantage de charges aérodynamiques et gravitationnelles directement au moyeu, à l'arbre principal, aux roulements, à la nacelle, à la tour et à la fondation. Des charges de fatigue plus élevées peuvent apparaître si les vibrations et les charges ne sont pas correctement maîtrisées. Exige des emplantures, une structure de moyeu et des roulements robustes. Peut accroître la masse structurelle et le coût.
Moyeu articulé	Utilisé sur certains rotors où un mouvement limité des pales à l'emplanture est nécessaire pour réduire les charges de flexion. Plus courant sur les éoliennes expérimentales, anciennes ou à usage spécial que sur les grandes machines commerciales modernes.	Permet aux pales de battre ou de se déplacer légèrement autour d'une articulation, ce qui peut réduire certaines charges de flexion cycliques sur l'emplanture et le moyeu. Peut diminuer les contraintes de fatigue résultant de la turbulence, de l'ombre de la tour et de charges aérodynamiques inégales. Peut améliorer le délestage des charges lorsque le vent varie.	Plus complexe mécaniquement qu'un moyeu rigide. Les charnières, axes, roulements et articulations mobiles exigent inspection, lubrification et maintenance. Les pièces mobiles supplémentaires peuvent accroître l'usure et nuire à la fiabilité. Le mouvement des pales doit être soigneusement maîtrisé pour éviter vibrations, instabilité ou comportement dynamique indésirable.
Moyeu à balancier	Couramment utilisé sur les éoliennes bipales. Le rotor peut osciller légèrement autour d'un axe de balancier, ce qui contribue à équilibrer les charges aérodynamiques entre les deux pales.	Réduit les moments de flexion transmis du rotor à l'arbre principal et à la nacelle. Aide à équilibrer les charges inégales sur les pales pendant la rotation. Peut réduire les contraintes structurelles des éoliennes bipales et permettre une structure de rotor plus légère. Utile pour diminuer les charges de fatigue dues au cisaillement du vent et à l'ombre de la tour.	Convient surtout aux conceptions bipales, et non aux éoliennes de grande puissance tripales standard. Exige une conception minutieuse pour éviter un mouvement de balancier excessif. Peut introduire un comportement dynamique complexe, des vibrations et des difficultés de commande. L'axe de balancier et les composants associés sont critiques et doivent faire l'objet d'une maintenance et d'une surveillance. Des butées ou amortisseurs mécaniques peuvent être nécessaires pour limiter le mouvement.

Note technique 2 Dans la conception pratique, le choix du moyeu influe fortement sur la transmission *des charges et les exigences de maintenance. Un moyeu rigide offre une meilleure stabilité géométrique, mais transmet davantage de charges à la chaîne cinématique et à la tour. Les moyeux articulés et à balancier peuvent réduire certaines charges structurelles en autorisant un mouvement maîtrisé, mais ils introduisent des axes, des articulations, des roulements, des amortisseurs ou des butées qui doivent être régulièrement inspectés. Le meilleur type de moyeu dépend donc de la taille du rotor, du nombre de pales, de la stratégie de commande, de la turbulence attendue, de l'accès pour la maintenance et de l'équilibre recherché entre simplicité structurelle et réduction des charges.*

2.2 Tour

La tour est l'une des principales parties structurelles d'une éolienne à axe horizontal. Sa fonction première est de soutenir la nacelle et le rotor à une hauteur appropriée au-dessus du sol, où le vent est généralement plus fort et plus régulier. En augmentant la hauteur du rotor, la tour permet à l'éolienne de capter davantage d'énergie éolienne et de fonctionner avec un meilleur rendement. Elle doit simultanément supporter en toute sécurité le poids de la nacelle, du rotor, des pales, de la chaîne cinématique et des autres équipements. Elle doit également résister aux efforts du vent, aux vibrations, aux moments de flexion et aux charges dynamiques générées pendant le fonctionnement. Deux types principaux de tours sont couramment utilisés sur les éoliennes à axe horizontal (voir figure 3.5) : les tours en treillis autoportantes, également appelées tours à structure triangulée, et les tours tubulaires. Les tours en treillis sont constituées d'éléments en acier reliés pour former une structure triangulée. Cette conception utilise moins de matériau et peut être relativement légère tout en offrant une bonne résistance. Ces tours étaient courantes sur les premières éoliennes et ont été largement utilisées jusque vers le milieu des années 1980. Elles sont aussi plus faciles à transporter sous forme de tronçons ou d'éléments d'acier séparés et peuvent être intéressantes lorsque le coût des matériaux et les contraintes de transport sont importants.

Le tableau 3.2 présente les applications, les avantages et les inconvénients de chaque type de tour.



Figure 3.5: Tours courantes d'éoliennes.

Note technique 3 Pour le choix pratique d'une éolienne, les tours en treillis peuvent être *intéressantes pour les petits projets ou les projets sensibles aux coûts, mais elles augmentent le travail d'inspection et de maintenance du fait de leurs nombreux boulons et assemblages exposés. Les tours tubulaires sont privilégiées dans les parcs modernes, car elles améliorent la sécurité des techniciens, protègent les systèmes internes et supportent de plus grandes éoliennes. Elles exigent toutefois des capacités plus importantes de fabrication, de transport et d'installation.*

Tableau 3.2: Applications, avantages et inconvénients de deux types courants de tours d'éoliennes.

Type de tour	Applications types	Avantages	Inconvénients
Tour en treillis autoportante / tour à structure triangulée	Utilisée sur les anciennes éoliennes à axe horizontal, les petites et moyennes éoliennes, les installations rurales et les sites où la réduction du coût des matériaux ou le transport facilité des tronçons sont importants. Peut également être utilisée là où l'aspect visuel est moins déterminant.	Utilise moins d'acier que de nombreuses conceptions tubulaires. Généralement plus légère et plus facile à transporter en éléments séparés. Peut être moins coûteuse pour les petites éoliennes. La disposition triangulée offre une bonne résistance structurelle. Le vent traverse la structure ouverte, ce qui réduit une partie de la pression exercée sur la tour.	Comporte de nombreux assemblages boulonnés qui exigent une inspection et un resserrage réguliers. L'accès de maintenance est davantage exposé aux intempéries, car la montée s'effectue généralement à l'extérieur. Moins sûre et moins confortable pour les techniciens qu'une tour tubulaire fermée. Souvent jugée moins esthétique. Plus vulnérable à la corrosion aux nombreux points d'assemblage exposés en l'absence de protection adéquate.
Tour tubulaire	Type le plus courant sur les éoliennes modernes à axe horizontal de grande puissance. Utilisée sur les grandes éoliennes terrestres, de nombreuses éoliennes en mer et dans les parcs commerciaux où la sécurité, la fiabilité, l'accès de maintenance et l'acceptation par le public sont importants.	Offre un support robuste et stable aux grands ensembles nacelle-rotor. Permet un accès intérieur plus sûr par échelles, escaliers ou ascenseurs. Protège les techniciens, les câbles, le câblage de commande et les équipements internes contre les intempéries. Présente un aspect plus épuré, généralement mieux accepté. Possède moins d'assemblages boulonnés exposés qu'une tour en treillis. Mieux adaptée aux grandes éoliennes modernes et aux moyeux de grande hauteur.	Généralement plus lourde et plus coûteuse qu'une tour en treillis. Les grands tronçons peuvent être difficiles à transporter, surtout pour les éoliennes très hautes ou les sites isolés. Exige des grues et des procédures d'installation rigoureuses. La qualité de la fabrication et des soudures est très importante. La structure fermée peut exiger ventilation, éclairage et dispositifs internes de sécurité pour les travaux de maintenance.

3 Composants mécaniques de la chaîne cinématique

Les composants mécaniques de la chaîne cinématique forment le principal chemin de transmission de la puissance à l'intérieur d'une éolienne (voir figure 3.1). Leur rôle est de transmettre, de manière maîtrisée et fiable, le mouvement de rotation et le couple produits par le rotor jusqu'à la génératrice. Cette partie comprend des composants essentiels tels que l'arbre principal, les roulements, le multiplicateur de vitesse, les accouplements, le système de freinage et les structures porteuses à l'intérieur de la nacelle. Ces composants doivent fonctionner ensemble malgré les variations de vitesse du vent, du couple, des vibrations et les charges mécaniques répétées. La compréhension de la chaîne cinématique est essentielle, car elle relie l'énergie aérodynamique captée par les pales à l'énergie électrique produite par la génératrice, tout en influençant le rendement, la fiabilité, les besoins de maintenance et la durée de vie globale de l'éolienne.

3.1 Arbre principal

L'arbre principal est l'un des composants mécaniques majeurs de la chaîne cinématique ; il est présenté à la figure 3.6. Son rôle principal consiste à transmettre le mouvement de rotation à faible vitesse et à couple élevé du moyeu vers le multiplicateur de vitesse ou, dans une éolienne à entraînement direct, directement vers la génératrice. Lorsque les pales captent l'énergie du vent, le rotor produit un couple qui est transmis du moyeu à l'arbre principal. Celui-ci doit transmettre régulièrement cette puissance de rotation tout en supportant les charges mécaniques dues à la pression du vent, au poids du rotor, à la gravité, aux vibrations, aux forces de freinage et aux changements de direction du vent. Situé entre le rotor et le reste de la chaîne cinématique, l'arbre principal est un maillon critique de la chaîne de conversion de l'énergie et influe fortement sur la fiabilité et les performances mécaniques de l'éolienne.

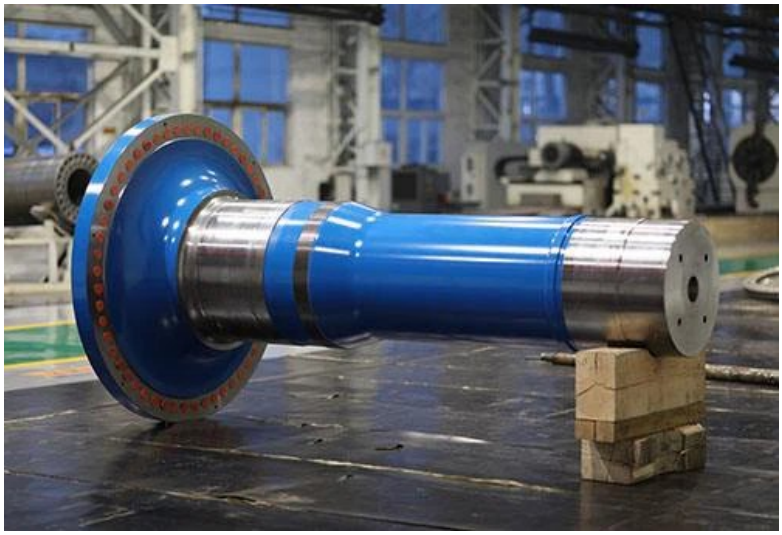


Figure 3.6: Arbre principal d'une éolienne non monté.

Le matériau de l'arbre principal doit présenter une résistance mécanique, une ténacité et une tenue à la fatigue élevées, ainsi qu'une bonne usinabilité. Dans la plupart des éoliennes, les arbres principaux sont généralement en acier forgé ou en acier allié à haute résistance, car ces matériaux peuvent supporter un couple

élevé et des charges cycliques répétées pendant de nombreuses années de fonctionnement. La surface de l'arbre peut également recevoir un traitement thermique ou une finition spéciale pour améliorer la résistance à l'usure et réduire le risque de fissuration. Comme l'arbre principal est soumis à des charges variables et à des vibrations, la qualité du matériau est très importante : des défauts internes, un mauvais traitement thermique ou des dommages de surface peuvent entraîner une rupture par fatigue. Le matériau est donc choisi non seulement pour sa résistance, mais également pour sa durabilité à long terme, sa résistance à la flexion et aux contraintes torsionnelles, ainsi que pour un fonctionnement sûr dans des conditions de vent sévères.

3.2 Roulements

Les roulements de l'arbre principal supportent l'arbre tournant et lui permettent de tourner régulièrement tout en reprenant les fortes charges mécaniques du rotor (voir figure 3.7). Ils réduisent les frottements entre l'arbre tournant et la structure fixe de la nacelle et aident ainsi la chaîne cinématique à transmettre efficacement le couple vers le multiplicateur ou la génératrice. Ils doivent résister aux charges radiales dues au poids du rotor, aux charges axiales dues à la poussée du vent et aux charges dynamiques provoquées par la turbulence, les vibrations, le freinage et les changements de direction du vent. De bonnes performances des roulements sont essentielles pour maintenir l'alignement de l'arbre, réduire l'usure, limiter les vibrations et protéger les autres composants de la chaîne cinématique, comme le multiplicateur et les accouplements. Une défaillance de roulement pouvant entraîner de graves dommages et une longue indisponibilité, la lubrification, la surveillance de la température, l'analyse vibratoire et les inspections régulières sont des activités importantes de maintenance.

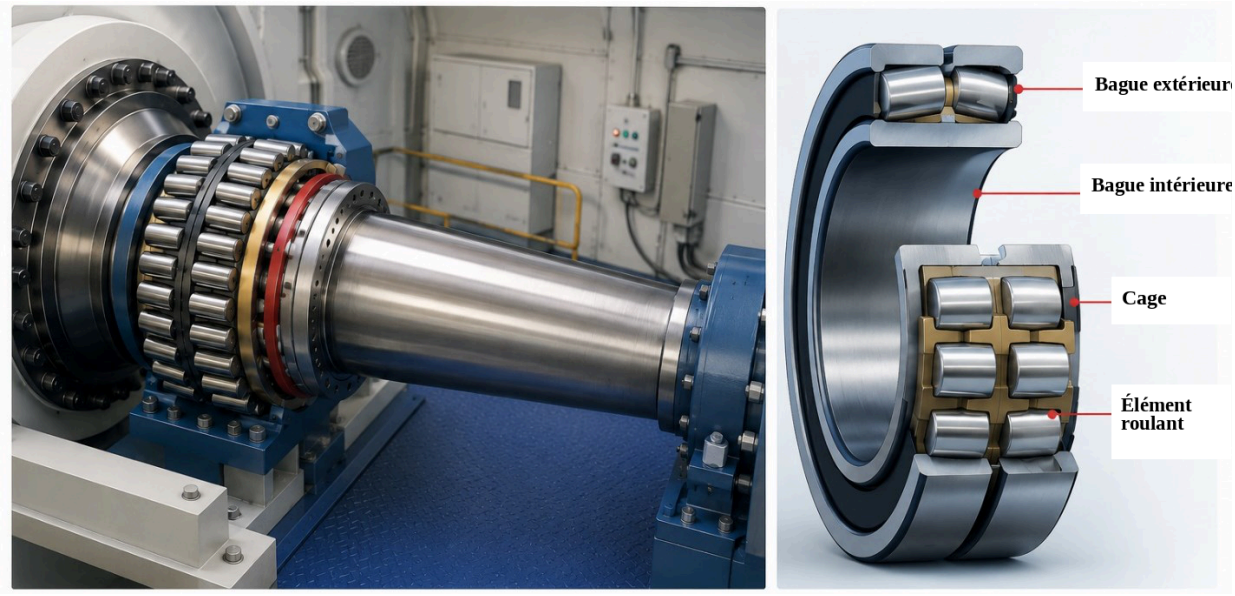


Figure 3.7: Arbre principal d'une éolienne non monté.

3.3 Multiplicateur de vitesse

Le multiplicateur de vitesse est un composant essentiel de la chaîne cinématique de nombreuses éoliennes. Il sert à transformer la rotation à faible vitesse et à couple élevé de l'arbre principal en une rotation plus rapide adaptée à la génératrice ; la figure 3.8 en montre une vue rapprochée. Les rotors tournent généralement lentement en raison du grand diamètre des pales ; le multiplicateur assure donc l'adaptation de vitesse entre le rotor et la génératrice. Il contient des trains d'engrenages, des roulements, des arbres, des circuits de lubrification et, parfois, des circuits de refroidissement qui transmettent ensemble efficacement la puissance mécanique. Un multiplicateur fiable est indispensable à un fonctionnement régulier, car l'usure, la surchauffe, les vibrations ou des problèmes de lubrification peuvent réduire le rendement et provoquer de graves défauts de la chaîne cinématique.



Figure 3.8: Vue de dessus du multiplicateur d'une éolienne Liberty Quantum Drive de puissance nominale 2,5 MW.

Un train épicycloïdal, également appelé train planétaire, est un agencement compact couramment utilisé dans les multiplicateurs d'éoliennes afin d'accroître la vitesse de rotation tout en transmettant un couple élevé. Il est dit « planétaire » parce qu'il comprend une roue solaire centrale, plusieurs satellites qui l'entourent, un porte-satellites et une couronne extérieure (voir figure 3.9). Les satellites tournent autour de leur propre axe tout en décrivant une révolution autour du solaire, à la manière des planètes autour du Soleil. Dans un multiplicateur d'éolienne, cette disposition transforme la rotation lente et à couple élevé du rotor et de l'arbre principal en une rotation plus rapide adaptée à la génératrice.

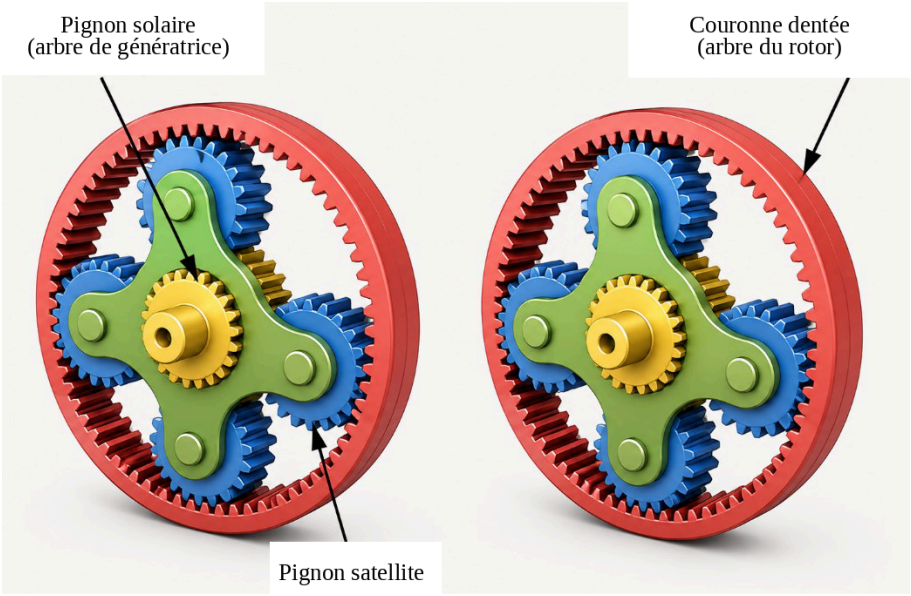


Figure 3.9: Train d'engrenages planétaire.

Le principal avantage d'un train planétaire est sa capacité à transmettre un couple très élevé dans une structure relativement compacte et légère. Comme la charge est répartie entre plusieurs satellites, la contrainte sur chaque dent est réduite par rapport à une paire d'engrenages simple. Les multiplicateurs planétaires conviennent donc aux éoliennes, dont le rotor produit un couple élevé et fluctuant lorsque le vent varie. Les étages planétaires sont souvent utilisés au premier étage d'un multiplicateur, car ils peuvent recevoir le couple élevé de l'arbre lent et assurer une augmentation efficace de la vitesse avant que la puissance ne passe aux autres étages.

En fonctionnement, le couple du rotor est généralement appliqué à un élément du train planétaire, comme le porte-satellites, tandis qu'un autre élément, souvent la couronne, peut être fixe. La sortie est alors prélevée sur le solaire ou sur un autre élément tournant, selon la conception du multiplicateur. Cet agencement permet d'obtenir différents rapports de transmission dans un espace compact. Plusieurs étages planétaires peuvent aussi être associés à des étages à arbres parallèles afin d'atteindre l'augmentation totale de vitesse requise par la génératrice. Par exemple, un rotor peut

ne tourner qu'à quelques dizaines de tours par minute, alors que la génératrice exige une vitesse beaucoup plus élevée ; le multiplicateur doit donc fournir un rapport de multiplication important.

Du point de vue technique et de la maintenance, les trains planétaires exigent un alignement précis, une lubrification de haute qualité, un refroidissement efficace et une surveillance attentive de l'état. Les dents, les roulements, les axes de satellites, le porte-satellites et la couronne sont soumis à des charges cycliques répétées, à des vibrations et à des variations de couple. Les problèmes courants comprennent l'usure et l'écaillage des dents, la détérioration des roulements, la contamination du lubrifiant, la surchauffe et le défaut d'alignement. Comme l'étage planétaire transmet un couple élevé, une détérioration précoce dans cette partie peut rapidement affecter l'ensemble de la chaîne cinématique. L'analyse de l'huile, la surveillance des vibrations et de la température et les inspections régulières sont donc importantes pour détecter les défauts avant qu'une défaillance grave du multiplicateur ne se produise.

Dans l'ensemble, le train planétaire est largement utilisé dans les multiplicateurs d'éoliennes parce qu'il offre un bon équilibre entre compacité, capacité de couple élevée, rendement et aptitude à convertir la vitesse. Il permet à la chaîne cinématique de transmettre les charges élevées du rotor tout en maintenant la taille et la masse du multiplicateur à des niveaux compatibles avec la nacelle. Sa complexité mécanique exige toutefois une bonne conception, une lubrification appropriée, une fabrication précise et une maintenance préventive pour assurer un fonctionnement fiable à long terme.

4 Freinage et composants mécaniques liés à la sécurité

Le freinage et les composants mécaniques liés à la sécurité sont indispensables, car ils protègent l'éolienne en fonctionnement normal, par vent fort, lors des arrêts d'urgence et des travaux de maintenance, ainsi qu'en situation de défaut. Une éolienne est soumise à une vitesse de vent variable, à la turbulence, à l'inertie du rotor et à de fortes charges mécaniques ; elle doit donc disposer de systèmes capables de ralentir, d'arrêter ou de verrouiller le rotor lorsque cela est nécessaire. Ces composants ne servent pas uniquement à arrêter la rotation : ils préviennent aussi la survitesse, réduisent les contraintes mécaniques, protègent le multiplicateur et la génératrice et offrent des conditions de travail sûres aux techniciens. Sur la plupart des éoliennes modernes, le freinage combine un freinage aérodynamique et un freinage mécanique, avec l'appui de systèmes de commande, de dispositifs de verrouillage du rotor, de capteurs et de fonctions d'arrêt d'urgence.

4.1 Mécanismes de freinage

Le premier mécanisme, et le plus courant, est le freinage aérodynamique, qui utilise les pales elles-mêmes pour réduire la vitesse du rotor. Sur les éoliennes à pas variable, les pales tournent autour de leur axe longitudinal afin de modifier leur angle par rapport au vent. Lorsque le pas s'écarte de la position optimale de production, la portance diminue et la traînée aérodynamique augmente, ce qui ralentit le rotor. Cette méthode est très répandue, car elle agit directement à la source de la captation d'énergie : le rotor. Le freinage aérodynamique est particulièrement important lorsque le vent est fort, en cas de survitesse, pendant les séquences d'arrêt et en fonctionnement d'urgence. Il réduit la quantité d'énergie mécanique qui pénètre dans la chaîne cinématique avant que de fortes charges n'atteignent l'arbre, le multiplicateur, les roulements et la génératrice.

Le deuxième mécanisme courant est le frein mécanique, généralement installé du côté de l'arbre rapide, à proximité du multiplicateur ou de la génératrice, bien que certaines conceptions puissent placer les composants de freinage autrement. Les freins mécaniques utilisent couramment un frein à disque, dans lequel des plaquettes serrent un disque en rotation pour créer un frottement et ralentir ou arrêter l'arbre (voir figure 3.10). Sur les éoliennes modernes, le frein mécanique n'est normalement pas le principal moyen de régler la vitesse du rotor en fonctionnement courant ; il sert plutôt de frein de stationnement, de frein de maintien, de frein de secours ou de frein d'urgence après que le freinage aérodynamique a déjà réduit la vitesse du rotor. En effet, l'arrêt d'un grand rotor par le seul frottement mécanique produirait une chaleur, une usure et des contraintes très élevées dans la chaîne cinématique.

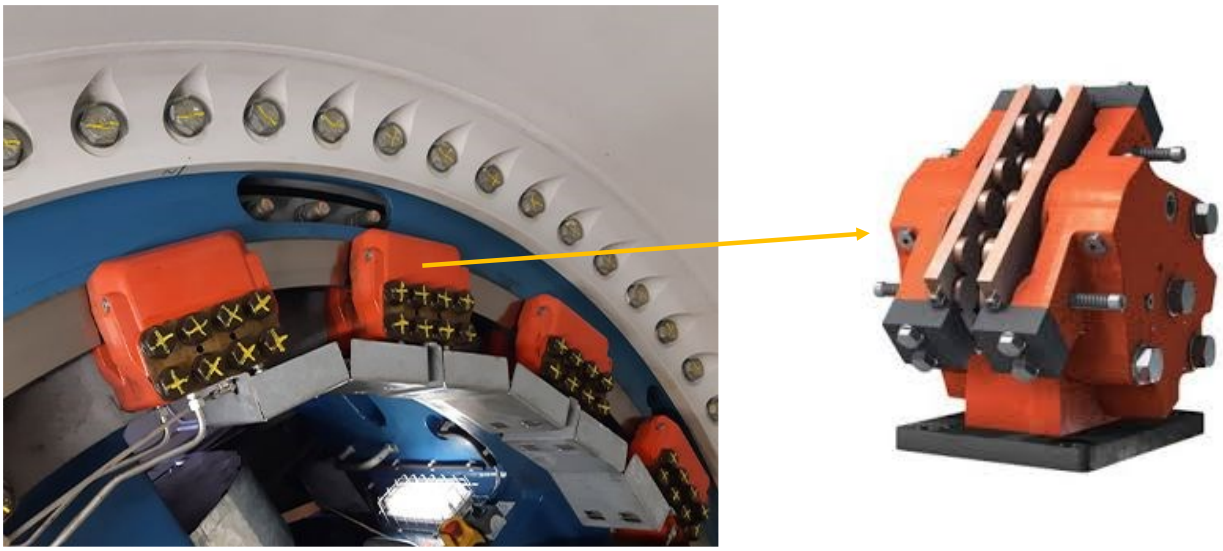


Figure 3.10: Système de freinage mécanique et plaquettes de frein.

4.2 Autres composants de sécurité

Les autres composants mécaniques liés à la sécurité comprennent les systèmes de verrouillage du rotor, les étriers de frein, les actionneurs de frein hydrauliques ou électriques, les dispositifs d'arrêt d'urgence et les dispositifs de protection contre la survitesse. Le verrou de rotor (voir figure 3.11) sert à empêcher physiquement tout mouvement du rotor pendant la maintenance ou l'inspection. Cette fonction est très importante, car même un vent faible peut provoquer un mouvement inattendu du rotor et créer de graves risques pour les techniciens qui travaillent à l'intérieur de la nacelle ou à proximité de pièces tournantes. Les actionneurs appliquent la force nécessaire au système de freinage, tandis que les capteurs surveillent la vitesse du rotor, la vitesse de l'arbre, l'état du frein, la position du pas, la température, les vibrations et les conditions de défaut. Ces signaux aident le système de commande à décider s'il faut réduire la puissance, régler le pas des pales, appliquer le freinage ou arrêter l'éolienne.

En exploitation, les systèmes de freinage doivent être soigneusement conçus, car un freinage brutal peut créer de fortes charges mécaniques. Si le rotor est arrêté trop rapidement, des contraintes torsionnelles peuvent se transmettre à l'arbre principal, au multiplicateur, aux accouplements, à l'arbre de la génératrice, au châssis de la nacelle, à la tour et à la fondation. Elles peuvent accroître les dommages par fatigue, voire provoquer la défaillance de composants. Pour cette raison, les éoliennes modernes suivent généralement une séquence d'arrêt maîtrisée : le système de commande modifie d'abord le pas des pales pour réduire la puissance aérodynamique ; la vitesse du rotor diminue ensuite ; enfin, le frein mécanique peut être appliqué pour immobiliser complètement l'éolienne ou la maintenir en stationnement. Cette approche combinée améliore la sécurité tout en réduisant l'usure et les chocs mécaniques.

Note technique 4

Du point de vue de la maintenance, les systèmes de freinage et de sécurité exigent des inspections régulières, car ils sont essentiels à la protection de l'éolienne. Les techniciens doivent contrôler l'usure des plaquettes, l'état du disque, la pression hydraulique, la réponse des actionneurs, le fonctionnement du verrou de rotor, la fonction d'arrêt d'urgence, les signaux des capteurs et les signes de surchauffe. Les problèmes courants comprennent notamment des plaquettes usées, des fuites hydrauliques, un frein qui frotte, une réponse tardive de l'actionneur, un défaut d'alignement du verrou de rotor, une surchauffe ou des signaux de commande incorrects. Les systèmes de freinage étant directement liés à la sécurité de l'éolienne, toute anomalie de ces composants doit être considérée avec sérieux et corrigée avant le retour au fonctionnement normal.

5 Mécanisme d'orientation en lacet

Le mécanisme d'orientation en lacet permet à une éolienne à axe horizontal de tourner et d'aligner son rotor sur la direction du vent (voir figure 3.1). Comme cette direction change continuellement, l'éolienne doit pouvoir faire pivoter la nacelle autour du sommet de la tour afin que les pales soient orientées le plus efficacement possible face à l'écoulement incident. Cet alignement améliore la captation d'énergie, réduit les charges aérodynamiques inégales et favorise un fonctionnement plus régulier. Le système d'orientation comprend généralement un roulement d'orientation, des entraînements ou moteurs de lacet, des couronnes dentées, des freins, des capteurs et une unité de commande qui utilise les mesures de direction du vent pour décider quand la nacelle doit tourner.

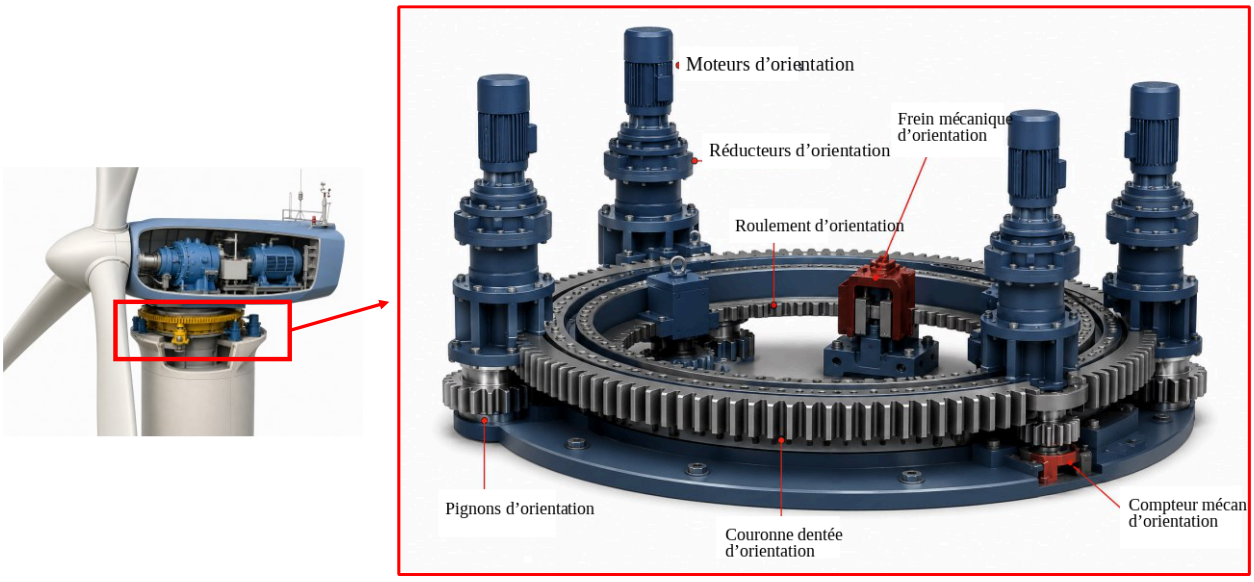


Figure 3.11 (vue dans la nacelle): Structure mécanique du mécanisme d'orientation en lacet.

Ce mécanisme est important non seulement pour la production de puissance, mais aussi pour la sécurité structurelle et la fiabilité mécanique. Si l'éolienne n'est pas correctement alignée sur le vent, le rotor peut subir des charges asymétriques, des vibrations accrues, une baisse de la puissance produite et de plus fortes contraintes sur les pales, le moyeu, l'arbre principal, le châssis de la nacelle, la tour et la fondation. Le système doit donc assurer un positionnement précis tout en résistant aux fortes charges mécaniques du rotor et de la nacelle. Un système d'orientation bien conçu contribue à la stabilité du fonctionnement, protège les composants de la chaîne cinématique et soutient les performances à long terme lorsque les conditions de vent varient.

5.1 Objet de la commande d'orientation en lacet

La commande d'orientation en lacet a pour objet de maintenir le rotor face à la direction du vent incident. Un bon alignement permet de capter davantage d'énergie, de réduire les pertes de puissance et d'éviter des charges inégales sur les pales, le moyeu, l'arbre principal, la nacelle, la tour et la fondation. Si l'éolienne n'est pas alignée, le rotor reçoit le vent sous un angle, ce qui peut réduire le rendement et augmenter les vibrations, la fatigue et les contraintes mécaniques.

Les méthodes les plus courantes sont la commande d'orientation active et l'orientation passive. Dans un système actif, des capteurs de direction du vent envoient des signaux au contrôleur, puis des moteurs électriques ou hydrauliques font pivoter la nacelle au moyen d'un roulement et d'un train d'engrenages d'orientation. Il s'agit de la méthode la plus courante sur les grandes éoliennes modernes à axe horizontal. Dans un système passif, l'éolienne utilise la force naturelle du vent, des empennages ou les forces du rotor pour s'aligner ; cette méthode plus simple est principalement employée sur les petites éoliennes. Les éoliennes modernes de grande puissance utilisent généralement une commande active, qui assure une meilleure précision, une plus grande stabilité et une meilleure production.

5.1.1 Commande active d'orientation en lacet

La commande active est la méthode d'orientation la plus courante sur les éoliennes modernes moyennes et grandes à axe horizontal (voir figure 3.12). Dans ce système, la rotation de la nacelle ne dépend pas uniquement de la force naturelle du vent : un système mécanique et électrique commandé la fait tourner activement pour orienter le rotor face au vent incident. L'objectif principal est de réduire l'erreur d'orientation, d'accroître la captation d'énergie et de diminuer les contraintes mécaniques inutiles sur la structure. Un système actif comprend généralement des capteurs de direction du vent, un contrôleur, des moteurs et entraînements d'orientation, un roulement d'orientation, une couronne dentée et des freins d'orientation. La girouette mesure la direction du vent incident et transmet l'information au système de commande. Si le contrôleur détecte que le rotor est mal aligné, il active les moteurs, qui font lentement tourner la nacelle autour de l'axe vertical situé au sommet de la tour jusqu'à ce que le rotor soit orienté plus précisément face au vent.

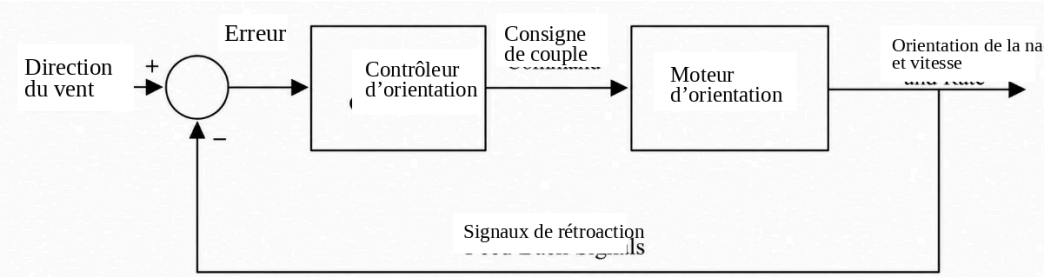


Figure 3.12: Schéma fonctionnel du système de commande active d'orientation en lacet.

Le roulement d'orientation, situé entre le sommet de la tour et la nacelle, est l'un des composants mécaniques les plus importants ; il permet à la nacelle de tourner régulièrement (voir figure 3.11). Les entraînements comprennent généralement des moteurs électriques et des réducteurs qui s'engrènent sur une grande couronne dentée. Comme la nacelle est très lourde et porte le rotor, le multiplicateur, la génératrice, le système de freinage et d'autres composants, le système d'orientation doit produire un couple élevé tout en se déplaçant lentement et précisément. Lorsque la nacelle atteint la position souhaitée, les freins la maintiennent et empêchent les mouvements indésirables sous l'effet du vent. La commande active est particulièrement importante sur les éoliennes de grande puissance, car leurs grands rotors doivent rester précisément alignés pour éviter d'importantes charges asymétriques. Si une grande éolienne fonctionne avec une erreur d'orientation, un côté du rotor peut subir des

forces aérodynamiques différentes de l'autre. Cela peut accroître la fatigue des pales, les charges sur le moyeu, les contraintes sur l'arbre principal, les vibrations de la tour et l'usure des roulements. La commande active améliore donc non seulement la puissance produite, mais également la

durée de vie et la fiabilité des composants. Inconvénients. La commande active est plus complexe que l'orientation passive et exige des capteurs, des moteurs, des freins, des engrenages, des câbles et un logiciel de commande. Ces éléments doivent être inspectés et entretenus. Les problèmes courants comprennent la défaillance des moteurs, l'usure des engrenages ou des freins, des erreurs de capteurs, des problèmes de lubrification et la détérioration du roulement d'orientation. Le système peut aussi s'orienter excessivement si la logique de commande réagit trop souvent à de faibles changements de direction. Les contrôleurs comprennent donc généralement une bande morte : la nacelle ne tourne que lorsque l'erreur d'orientation devient suffisamment grande ou persiste pendant une durée donnée.

5.1.2 Commande passive d'orientation en lacet

L'orientation passive est une méthode plus simple dans laquelle l'éolienne s'aligne principalement grâce aux forces aérodynamiques naturelles plutôt qu'à des moteurs et à des systèmes de commande actifs (voir figure 3.13). Elle est surtout utilisée sur les petites éoliennes destinées à l'électrification rurale, à la recharge de batteries, au pompage de l'eau, aux petites exploitations agricoles, aux télécommunications et aux applications hors réseau. Un système passif peut utiliser un empennage, les forces aérodynamiques du rotor ou une configuration de rotor sous le vent pour s'orienter naturellement. La méthode passive la plus courante utilise un empennage qui fonctionne comme celui d'une girouette. Lorsque la direction du vent change, celui-ci pousse sur la surface de l'empennage et crée un moment qui fait tourner le corps de l'éolienne jusqu'à ce que le rotor soit face au vent. Cette méthode mécaniquement simple n'exige ni moteur électrique d'orientation, ni capteurs complexes, ni système de commande. Les systèmes passifs sont donc moins coûteux, plus légers et plus faciles à entretenir que les systèmes actifs.



Figure 3.13: Schéma fonctionnel du système passif d'orientation en lacet.

Une autre méthode passive est employée sur certaines éoliennes sous le vent, dont le rotor se trouve derrière la tour par rapport à la direction du vent. Dans cette disposition, le vent pousse naturellement le rotor et la nacelle pour les aligner ; l'éolienne peut donc s'orienter sans entraînement motorisé. Les éoliennes sous le vent peuvent toutefois subir l'effet d'ombre

de la tour : celle-ci perturbe l'écoulement avant qu'il n'atteigne les pales, ce qui peut accroître les vibrations, le bruit et les charges cycliques sur le rotor. La commande passive est utile lorsque le faible coût, la simplicité de construction et la facilité de maintenance sont plus importants qu'une grande précision d'orientation. Sur les petites éoliennes, le rotor et la nacelle sont relativement légers, et les forces naturelles du vent suffisent généralement à les faire tourner. Les systèmes passifs conviennent aussi aux zones isolées, car ils exigent moins de composants électriques et mécaniques. Ils sont donc adaptés aux systèmes d'énergie renouvelable de base où les ressources de maintenance peuvent être limitées.

Inconvénient. Le principal inconvénient de l'orientation passive est sa moindre précision. L'éolienne ne fait pas toujours parfaitement face au vent, notamment lorsque celui-ci est turbulent ou change rapidement, ce qui peut réduire la production et accroître les vibrations. Le système peut également osciller ou « rechercher » la direction du vent lorsque celui-ci est instable. L'orientation passive ne convient généralement pas aux grandes éoliennes, car leur nacelle et leur rotor sont trop lourds et un mouvement non maîtrisé pourrait engendrer de fortes charges structurelles.

Résumé de la séance

Cette séance a présenté les principales structures et mécanismes mécaniques des éoliennes à axe horizontal, en insistant sur la contribution de chaque composant à la conversion de l'énergie, à la transmission des charges, à la sécurité et à la fiabilité du fonctionnement. Les apprenants ont étudié l'éolienne comme un système mécanique intégré : le rotor capte l'énergie du vent ; le moyeu et l'arbre principal transmettent un mouvement à faible vitesse et à couple élevé ; la chaîne cinématique transmet la puissance mécanique à la génératrice ; enfin, la tour et la fondation supportent l'ensemble de la structure. La séance a également expliqué les liens étroits entre les systèmes aérodynamiques, mécaniques et électriques : les variations de vitesse du vent, de charge sur les pales, d'alignement en lacet, de vibrations de la chaîne cinématique, d'état du multiplicateur et de couple de la génératrice peuvent toutes influencer les performances et la durée de vie des composants. Les principales parties structurelles étudiées comprennent le rotor, le moyeu, les liaisons à l'emplanture, les types de tours, les composants de la chaîne cinématique portés par la nacelle et le chemin de transmission des charges jusqu'à la fondation.

La séance a aussi examiné d'importants composants de la chaîne cinématique et de sécurité, notamment l'arbre principal, les roulements, le multiplicateur de vitesse, le train planétaire, les mécanismes de freinage, les dispositifs de verrouillage du rotor et les systèmes d'orientation. Une attention particulière a été accordée aux questions pratiques d'exploitation et de maintenance, comme les charges de fatigue, les vibrations, la qualité de la lubrification, l'usure des roulements, la surchauffe du multiplicateur, l'état des plaquettes de frein, la sécurité du verrouillage du rotor, les erreurs d'orientation et la surveillance par capteurs. Les apprenants ont comparé les moyeux rigides, articulés et à balancier, ainsi que les tours en treillis et tubulaires, en identifiant leurs applications, leurs avantages et leurs inconvénients. Enfin, la séance a expliqué les méthodes active et passive d'orientation en lacet, montrant qu'une bonne orientation de la nacelle améliore la captation d'énergie tout en réduisant les charges mécaniques inégales. Dans l'ensemble, cette séance fournit une base solide pour comprendre comment les composants mécaniques d'une éolienne fonctionnent conjointement afin d'assurer une production d'énergie efficace, sûre et durable.

Structure électrique des éoliennes — Partie I

Objectifs d'apprentissage:

- Identifier les principaux composants électriques d'une éolienne, notamment les génératrices, les convertisseurs, les transformateurs, les câbles, l'appareillage de coupure et de protection, les systèmes de protection et les unités de commande.
- Expliquer le principe fondamental de production d'énergie électrique par induction électromagnétique et décrire la conversion de la rotation mécanique en puissance électrique.
- Distinguer les principaux types de génératrices éoliennes, notamment les génératrices synchrones, les génératrices asynchrones, les systèmes DFIG et les génératrices synchrones à aimants permanents.
- Décrire le processus de conversion électrique depuis le mouvement du rotor jusqu'à une puissance compatible avec le réseau, notamment le rôle de la tension, du courant, de la fréquence et de l'électronique de puissance.
- Reconnaître les principales considérations de conception électrique des éoliennes, notamment le rendement, l'isolation, le refroidissement, la fiabilité, la protection et les exigences d'intégration au réseau.

Résumé

Cette séance, intitulée « Structure électrique des éoliennes — Partie I », présente aux apprenants les principaux composants électriques et les principes de conversion de l'énergie utilisés dans les systèmes éoliens. Elle traite des génératrices, des convertisseurs, des transformateurs, des câbles, des unités de commande et des systèmes de protection, tout en expliquant comment la rotation mécanique du rotor est convertie en énergie électrique par induction électromagnétique. Les apprenants étudieront les types courants de génératrices, notamment les génératrices asynchrones, les génératrices synchrones, les DFIG et les génératrices synchrones à aimants permanents. Ils examineront aussi la manière dont la tension, le courant, la fréquence, l'électronique de puissance, le refroidissement, l'isolation et la compatibilité avec le réseau influencent les performances, la fiabilité et l'intégration des éoliennes dans les systèmes électriques modernes.

1 Introduction aux systèmes électriques des éoliennes

1.1 Vue d'ensemble du sous-système électrique

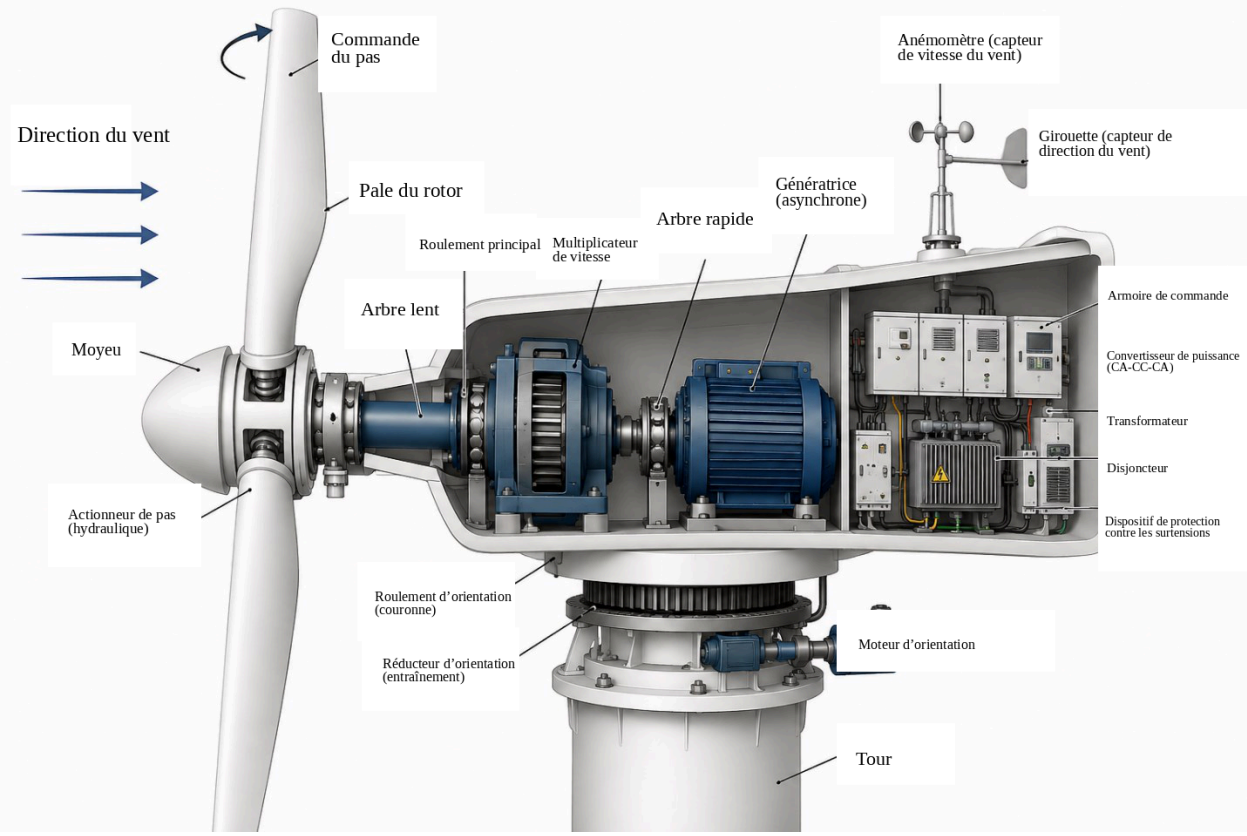
Le sous-système électrique d'une éolienne convertit l'énergie mécanique de rotation produite par le rotor et la chaîne cinématique en puissance électrique utilisable. Après que le vent a mis les pales en rotation, le couple mécanique est transmis par l'arbre principal et, dans de nombreuses conceptions, par un multiplicateur de vitesse jusqu'à la génératrice. Celle-ci est la machine électrique centrale qui convertit le mouvement de rotation en énergie électrique selon le principe de l'induction électromagnétique. Selon la conception, il peut s'agir d'une génératrice asynchrone, d'une génératrice synchrone, d'une génératrice asynchrone à double alimentation ou d'une génératrice synchrone à aimants permanents.

Le sous-système électrique d'une éolienne moderne ne se limite pas à la génératrice. Il comprend plusieurs composants interconnectés qui conditionnent, protègent, commandent et transmettent l'énergie électrique : convertisseurs de puissance, onduleurs, transformateurs, appareillage de coupure et de protection, câbles, dispositifs de protection, capteurs, systèmes de refroidissement, systèmes d'isolation et unités de commande. Les convertisseurs et les onduleurs sont particulièrement importants sur les éoliennes à vitesse variable, car ils règlent la tension, la fréquence et le flux de puissance afin de rendre l'électricité produite compatible avec les exigences du réseau. Les transformateurs élèvent la tension produite jusqu'à un niveau adapté à son transport vers le réseau collecteur du parc ou le réseau électrique. Les câbles et l'appareillage assurent un acheminement et une commutation sûrs de la puissance, tandis que les systèmes de protection détectent les situations anormales telles que les surintensités, les courts-circuits, les défauts à la terre, la surchauffe et les perturbations de tension. Le sous-système électrique constitue donc le pont entre l'énergie mécanique captée dans le vent et l'énergie électrique fournie aux consommateurs ou au réseau. Ses performances influencent directement le rendement, la fiabilité, la qualité de l'électricité et la sécurité d'exploitation. En termes simples, il doit produire l'électricité, la réguler, protéger l'éolienne contre les défauts et garantir que la puissance produite satisfait aux exigences techniques du réseau raccordé. Cette séance présente ces principaux composants et explique leur fonctionnement conjoint dans la chaîne globale de conversion de l'énergie.

1.2 Interaction avec les systèmes mécaniques et de commande

Le système électrique d'une éolienne ne fonctionne pas de façon indépendante. Il est étroitement lié au système mécanique et au système de commande. Le système mécanique capte l'énergie du vent et la transforme en mouvement de rotation ; le système électrique convertit cette rotation en puissance électrique ; le système de commande supervise et règle les deux afin d'assurer un fonctionnement efficace, stable et sûr de l'éolienne (voir figure 4.1).

Figure 4.1 Vue d'ensemble de l'interaction entre les composants mécaniques, de commande et électriques d'une éolienne.



Selon la figure 4.1, l'interaction commence au niveau du rotor et de la chaîne cinématique. Le vent exerce des forces aérodynamiques sur les pales, ce qui met le rotor en rotation. Cette énergie de rotation est transmise par le moyeu, l'arbre principal, les roulements et, le cas échéant, un multiplicateur de vitesse avant d'atteindre la génératrice. Celle-ci convertit alors le couple mécanique et la vitesse de rotation en puissance électrique. La vitesse du vent étant naturellement variable, l'entrée mécanique de la génératrice varie elle aussi continuellement. Ces variations agissent sur la vitesse et le couple de la génératrice, ainsi que sur la tension, le courant et la fréquence. Le système électrique doit donc être conçu pour réagir aux variations des conditions mécaniques sans produire une électricité instable ou de mauvaise qualité. Le système de commande joue un rôle central dans cette interaction. Il reçoit les informations de capteurs qui mesurent la vitesse du vent, la vitesse du rotor, la vitesse de la génératrice, la température, les vibrations, la tension, le courant, la fréquence et la puissance produite. À partir de ces données, il ajuste le fonctionnement de l'éolienne. La commande du pas modifie l'angle des pales afin de réguler la captation de puissance aérodynamique. La commande d'orientation en lacet aligne la nacelle et le rotor sur la direction du vent. La commande du couple de la génératrice ajuste la charge électrique de la génératrice pour optimiser la captation d'énergie et éviter les surcharges mécaniques. Sur les éoliennes à vitesse variable, l'électronique de puissance permet à la génératrice de fonctionner sur une plage de vitesses plus étendue tout en fournissant une électricité compatible avec le réseau.

En résumé : cette relation montre que les systèmes mécanique, électrique et de commande constituent une chaîne intégrée de conversion de l'énergie. Le système mécanique fournit le mouvement, le système électrique convertit et conditionne la puissance, et le système de commande coordonne le fonctionnement des deux. Une faiblesse ou un défaut dans un sous-système peut affecter les autres. Par exemple, des vibrations mécaniques excessives peuvent endommager les roulements de la génératrice ou les connexions électriques. Une commande électrique inadéquate peut accroître les contraintes mécaniques sur la chaîne cinématique. Des données de capteurs erronées peuvent entraîner des actions incorrectes de commande du pas, d'orientation en lacet ou de la génératrice. Le fonctionnement fiable d'une éolienne dépend donc d'une bonne coordination entre les structures mécaniques, les composants électriques et les stratégies de commande.

1.3 Importance de la conception électrique pour la production d'énergie

La conception électrique est un facteur déterminant des performances globales d'une éolienne, car elle détermine l'efficacité avec laquelle l'énergie du vent captée est convertie en électricité utilisable. Même si les systèmes aérodynamiques et mécaniques captent une grande quantité d'énergie, une mauvaise conception électrique peut entraîner des pertes, un fonctionnement instable, une surchauffe, des défaillances de composants et une dégradation de la qualité de l'électricité. Un système bien conçu améliore la production, protège les composants coûteux, facilite l'intégration au réseau et prolonge la durée de service de l'éolienne. Le rendement est l'un des objectifs de conception les plus importants. Des pertes électriques peuvent se produire dans les enroulements de la génératrice, les convertisseurs, les transformateurs, les câbles et les composants de commutation. Elles sont généralement transformées en chaleur, ce qui réduit la puissance utile et peut endommager les composants si cette chaleur n'est pas correctement maîtrisée. La conception doit donc prévoir une section appropriée des conducteurs, des composants à faibles pertes, un choix efficace de la génératrice, des caractéristiques nominales adéquates des transformateurs et une bonne gestion thermique. Le refroidissement des génératrices et des convertisseurs est indispensable, car une température excessive peut réduire la durée de vie de l'isolation, abaisser le rendement et accroître le risque de défaillance.

La fiabilité constitue une autre exigence importante. Les éoliennes fonctionnent souvent dans des zones isolées, en mer ou dans des conditions météorologiques sévères où la maintenance peut être difficile et coûteuse. Les composants électriques doivent donc résister aux variations de température, à l'humidité, aux vibrations, à la poussière, à la foudre, aux perturbations du réseau et aux changements continus de charge. Les systèmes d'isolation, les dispositifs de mise à la terre, la protection contre les surtensions, la protection contre les défauts et les dispositifs de surveillance sont tous essentiels à un fonctionnement sûr et fiable. Une défaillance du sous-système électrique peut immobiliser complètement l'éolienne, avec une perte de production et des coûts de maintenance accrus. La conception électrique influe aussi fortement sur la compatibilité avec le réseau, elle-même liée à la fiabilité de celui-ci. L'électricité produite doit respecter les exigences du réseau concernant la tension, la fréquence, le facteur de puissance, la synchronisation et la qualité de l'électricité. Comme la vitesse du vent varie continuellement, la puissance électrique de l'éolienne peut fluctuer. L'électronique de puissance aide à gérer ces fluctuations en

commandant la tension et la fréquence et en permettant un fonctionnement à vitesse variable. L'éolienne peut ainsi capter davantage d'énergie à différentes vitesses du vent tout en fournissant une puissance électrique stable. Dans les éoliennes modernes, la conception électrique ne consiste donc pas seulement à produire de l'électricité, mais à produire une électricité sûre, stable,

commandable et acceptable pour le raccordement au réseau. En résumé, la conception électrique est essentielle à la production d'énergie, car elle détermine la quantité de puissance produite, la sécurité du fonctionnement, l'efficacité de la fourniture et la fiabilité du maintien du raccordement au réseau. Une conception robuste augmente la disponibilité, réduit les indisponibilités, améliore la qualité de l'électricité et contribue aux performances économiques à long terme des systèmes éoliens.

2 Principes fondamentaux de la production d'électricité

La production d'électricité dans une éolienne repose sur la conversion électromécanique de l'énergie : la puissance mécanique captée par les pales est transmise à travers la chaîne cinématique puis convertie en puissance électrique par la génératrice (voir figure 4.1). Celle-ci est présentée comme une machine électromécanique réversible : la même machine physique peut fonctionner en moteur, en convertissant la puissance électrique en rotation mécanique, ou en génératrice, en convertissant la puissance mécanique de l'arbre en puissance électrique. Dans une éolienne, elle fonctionne selon le second mode. Le système aérodynamique produit un couple au rotor, le système mécanique transmet ce couple à l'arbre de la génératrice et la génératrice convertit l'entrée mécanique tournante en tension et en courant par interaction électromagnétique (voir figure 4.2). Cette section présente trois grandes familles de machines utilisées pour cette conversion : les machines à courant continu, les machines synchrones et les machines asynchrones. Les génératrices asynchrones sont particulièrement courantes dans l'éolien en raison de leur construction robuste, de leurs faibles besoins de maintenance et de l'absence de balais ou d'excitation de champ séparée en courant continu.

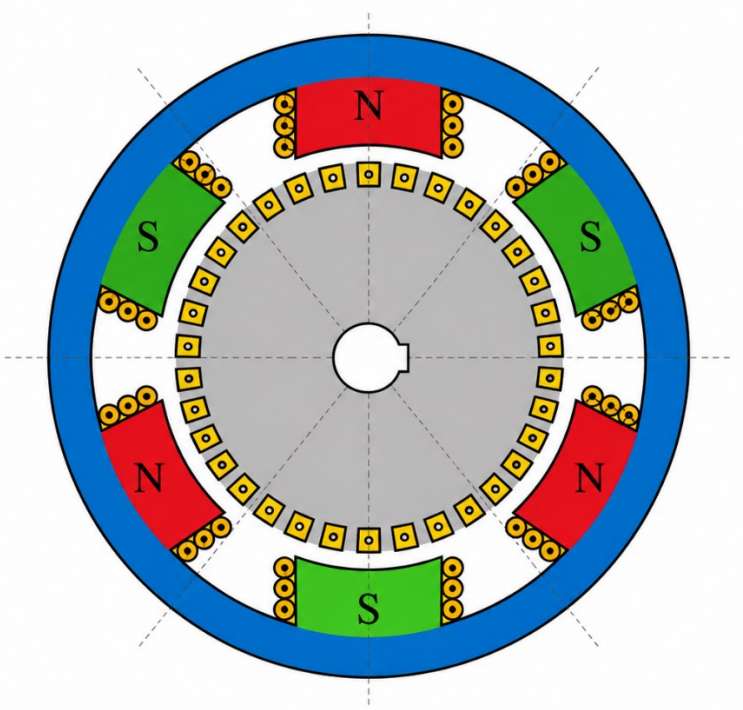


Figure 4.2: Coupe du stator et du rotor d'une machine électrique.

La structure physique fondamentale d'une génératrice tournante comprend deux principaux éléments électromagnétiques : le stator, immobile, et le rotor, qui tourne à l'intérieur du stator. Ces deux éléments sont séparés par un entrefer étroit, l'une des régions les plus importantes de la machine puisque le couplage électromagnétique utile s'effectue à travers lui. Le stator et le rotor comprennent tous deux des noyaux ferromagnétiques à forte perméabilité qui permettent au flux magnétique de parcourir la machine avec un effort de magnétisation relativement faible. Les

conducteurs sont placés dans des encoches réparties autour de la surface du noyau ou enroulés autour de pôles magnétiques saillants. Le flux créé par l'un des éléments traverse les conducteurs de l'autre ; l'interaction entre le flux magnétique et le courant électrique produit une force électromagnétique, un couple et la conversion de puissance. En mode génératrice, cette interaction s'oppose au couple mécanique appliqué conformément à la loi de Lenz, ce qui signifie qu'une puissance mécanique d'entrée est nécessaire pour maintenir une puissance électrique de sortie.

La base théorique de la production de tension est la loi de Faraday sur l'induction électromagnétique :

$$e = -\frac{d\phi}{dt} \qquad (4.1)$$

où e est la tension induite et φ le flux magnétique lié. Le signe négatif représente la loi de Lenz, selon laquelle la tension et le courant induits s'opposent à la variation de flux qui les a produits. Dans une machine tournante, la variation du flux lié résulte soit du mouvement des conducteurs du rotor par rapport au champ magnétique, soit de la rotation du champ magnétique par rapport aux conducteurs du rotor. Une tension est donc induite chaque fois qu'il existe un mouvement relatif entre les conducteurs et le flux magnétique. La valeur de la tension induite augmente avec la vitesse de variation du flux lié, elle-même dépendante de l'intensité du flux magnétique, de la vitesse de rotation, du nombre de spires et de la géométrie de la machine.

Dans les génératrices éoliennes, le champ magnétique peut être créé de différentes manières selon le type de machine :

- Dans une machine à courant continu, l'excitation peut être fournie par des enroulements d'excitation ou des aimants permanents ; une commutation mécanique ou un redressement électronique permet d'obtenir une sortie continue. Les machines conventionnelles utilisent des balais et des collecteurs, ce qui accroît la maintenance et réduit la fiabilité. Les petits systèmes éoliens modernes peuvent utiliser des machines à courant continu sans balais et à aimants permanents, dans lesquelles le rotor porte les aimants et le stator l'enroulement d'induit ; la tension alternative produite est ensuite redressée électroniquement.
- Dans une génératrice synchrone, le champ magnétique rotorique tourne à la même vitesse que le champ statorique. Le rotor exige généralement une excitation continue ou des aimants permanents. Ces génératrices permettent une commande plus directe de la tension et de la puissance réactive, mais sont moins naturellement adaptées au fonctionnement éolien à vitesse variable si elles ne sont pas associées à des convertisseurs électroniques de puissance.
- Dans une génératrice asynchrone, le champ magnétique est produit par l'alimentation alternative du stator, et des courants sont induits dans le rotor par le mouvement

La loi de Lenz énonce que le courant électrique induit dans un conducteur par un champ magnétique variable circule dans un sens tel que le champ magnétique créé par le courant induit s'oppose aux variations du champ magnétique initial. Elle porte le nom du physicien Heinrich Lenz, qui l'a formulée en 1834.

relatif entre le champ tournant et les conducteurs rotoriques. Cette configuration rend la machine mécaniquement simple et électriquement robuste, ce qui explique son utilisation étendue dans les parcs éoliens (voir figure 4.3).

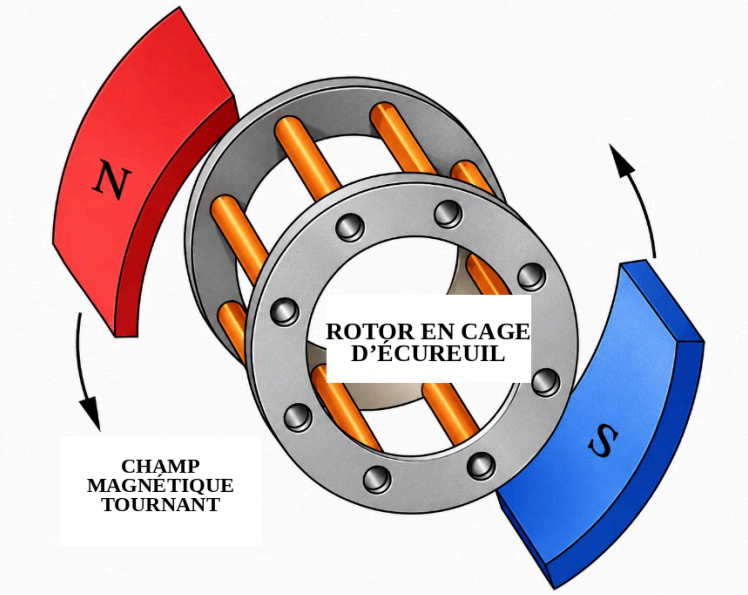


Figure 4.3: Rotor en cage d'écureuil d'une machine asynchrone soumis à un champ magnétique tournant.

Le principe de la génératrice asynchrone est particulièrement important pour les éoliennes. Dans une machine triphasée, le stator comporte trois enroulements de phase physiquement décalés. Alimentés par un système alternatif triphasé équilibré, ils produisent un champ magnétique tournant. La vitesse de ce champ, appelée vitesse synchrone, est donnée par :

$$N_s = \frac{60f}{p} \qquad (4.2)$$

où N_s est la vitesse synchrone en tours par minute, f la fréquence électrique et p le nombre de paires de pôles magnétiques. Cette équation montre que, pour une fréquence de réseau donnée, la vitesse synchrone est déterminée par le nombre de pôles de la génératrice. Par exemple, une machine raccordée à un réseau de 60 Hz doit fonctionner près de 3 600 tr/min pour une configuration à deux pôles, 1 800 tr/min pour quatre pôles et 1 200 tr/min pour six pôles. Comme les rotors d'éoliennes tournent généralement beaucoup plus lentement, en particulier sur les grandes machines, un multiplicateur de vitesse ou une génératrice spéciale à faible vitesse est souvent nécessaire.

Le rotor d'une machine asynchrone à cage d'écureuil (voir figure 4.3) se compose de barres conductrices court-circuitées par des anneaux d'extrémité. Lorsque le champ tournant du stator balaie ces barres, il y induit une tension conformément à la loi de Faraday. Comme elles sont court-circuitées, la tension induite produit

un courant rotorique. L'interaction entre le flux statorique et le courant rotorique produit le couple électromagnétique, qui peut être représenté théoriquement par :

$$T = K\Phi I_2 \cos \varphi_2 \qquad (4.3)$$

où T est le couple électromagnétique, K une constante de la machine, Φ l'amplitude de l'onde de flux statorique, I_2 le courant rotorique et φ_2 l'angle de phase entre la tension induite au rotor et le courant rotorique. Cette relation montre que la production de couple dépend non seulement des amplitudes du flux et du courant, mais aussi de leur déphasage. Autrement dit, une conversion électromécanique utile exige une composante active du courant rotorique qui interagisse efficacement avec le flux dans l'entrefer.

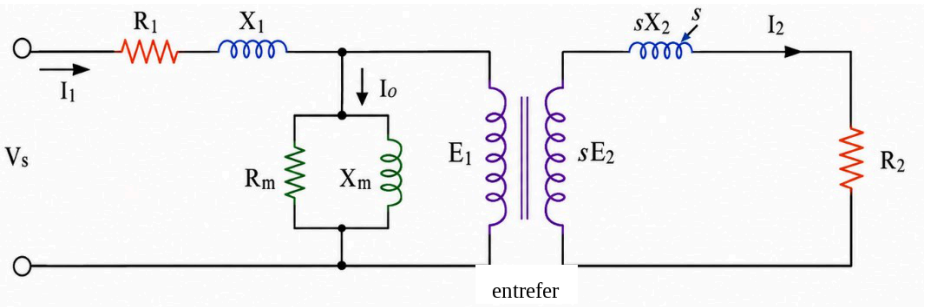
La notion de glissement est centrale dans la théorie de la génératrice asynchrone. Le glissement décrit la vitesse relative entre le champ tournant statorique et la vitesse mécanique du rotor :

$$s = \frac{N_s - N_r}{N_s} \qquad (4.4)$$

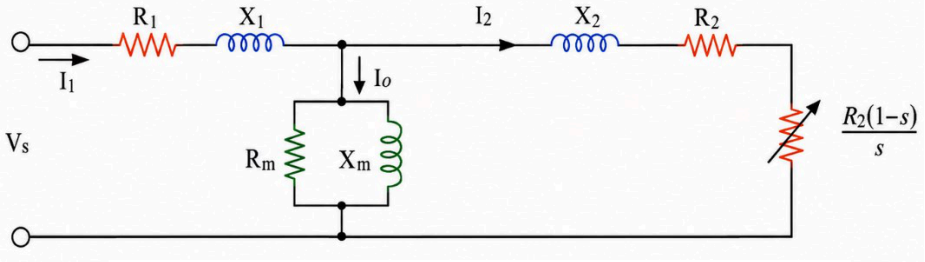
où s est le glissement, N_s la vitesse synchrone et N_r la vitesse mécanique du rotor. En fonctionnement moteur, la vitesse du rotor est légèrement inférieure à la vitesse synchrone et le glissement est positif. En fonctionnement en génératrice, l'éolienne entraîne le rotor au-dessus de la vitesse synchrone, de sorte que le glissement devient négatif. Cette condition de glissement négatif inverse le sens du courant rotorique et du couple électromagnétique, ce qui permet de convertir la puissance mécanique de l'arbre de l'éolienne en puissance électrique fournie aux bornes du stator, puis à la charge ou au réseau. Une génératrice asynchrone directement raccordée au réseau fonctionne donc normalement à une vitesse supersynchrone, c'est-à-dire légèrement supérieure à la vitesse synchrone.

Du point de vue de la conversion d'énergie, la machine asynchrone se comporte comme un transformateur dont l'enroulement secondaire est mobile. Le stator agit comme l'enroulement primaire et le rotor comme un secondaire court-circuité. À la différence d'un transformateur statique, le mouvement relatif entre le champ statorique et les conducteurs rotoriques modifie la fréquence, le courant et le comportement de conversion de la puissance dans le circuit du rotor. La vitesse mécanique détermine le glissement ; celui-ci détermine la fréquence et le courant rotoriques ; le courant rotorique détermine le couple électromagnétique et la puissance convertie. C'est pourquoi la vitesse, le couple, le courant, l'échauffement et la puissance électrique produite sont étroitement liés en fonctionnement éolien.

Les performances théoriques de la génératrice asynchrone sont couramment analysées au moyen du schéma équivalent de la figure 4.4.



(a) Circuit équivalent du stator et du rotor à travers l'entrefer



(b) Circuit équivalent de la machine asynchrone ramené au stator

Figure 4.4: Schéma électrique équivalent d'une machine asynchrone utilisé pour le calcul des performances.

Dans ce modèle, R1 et X1 représentent la résistance au stator et la réactivité aux fuites, tandis que R2 et X2 représentent la résistance au rotor et la réactivité aux fuites du côté du stator. La branche magnétisante, représentée par Xm et Rm, explique le flux magnétique nécessaire pour le fonctionnement et les pertes de cœur telles que l'hystérie et les pertes de courant. Le terme R2(1-s)/s dépendant du glissement représente la partie du circuit rotor associée à la conversion d'énergie électromécanique. Ce terme est fondamental car il relie le comportement du circuit électrique à la conversion mécanique de la puissance. La puissance électromécanique convertie dans une machine à induction en trois phases peut être exprimée comme suit:

$$P_{em} = 3I_2^2 R_2 \frac{(1-s)}{s} \qquad (4.5)$$

Cette expression montre que la puissance convertie dépend du courant rotorique, de la résistance rotorique et du glissement. Lorsque le glissement est nul, le rotor se déplace à la même vitesse que le champ statorique : il n'existe aucun mouvement relatif, le courant rotorique tend vers zéro et aucune conversion électromécanique n'a lieu. Lorsque la machine fonctionne en génératrice, le glissement est négatif, ce qui indique que la puissance mécanique est fournie à l'arbre et que la puissance électrique sort par les bornes du stator. Le couple de la génératrice est donc égal à la puissance convertie divisée par la vitesse angulaire :

$$T_{em} = \frac{P_{em}}{\omega} \qquad (4.6)$$

où T_{em} est le couple électromagnétique et ω la vitesse angulaire du rotor. Cette relation est importante dans les éoliennes, car la génératrice ne se contente pas de « produire de l'électricité » : elle applique également un contre-couple électromagnétique à la chaîne cinématique. Le système de commande de l'éolienne peut donc réguler la captation de puissance en agissant sur le couple de la génératrice, soit directement par l'électronique de puissance dans les systèmes à vitesse variable, soit indirectement par les caractéristiques de la génératrice couplée au réseau dans les systèmes à vitesse fixe. Un équilibre stable doit être maintenu entre le couple aérodynamique produit par les pales et le couple électromagnétique de la génératrice. Si le couple aérodynamique dépasse le couple de la génératrice, le rotor accélère ; dans le cas inverse, il décélère (voir figure 4.5).

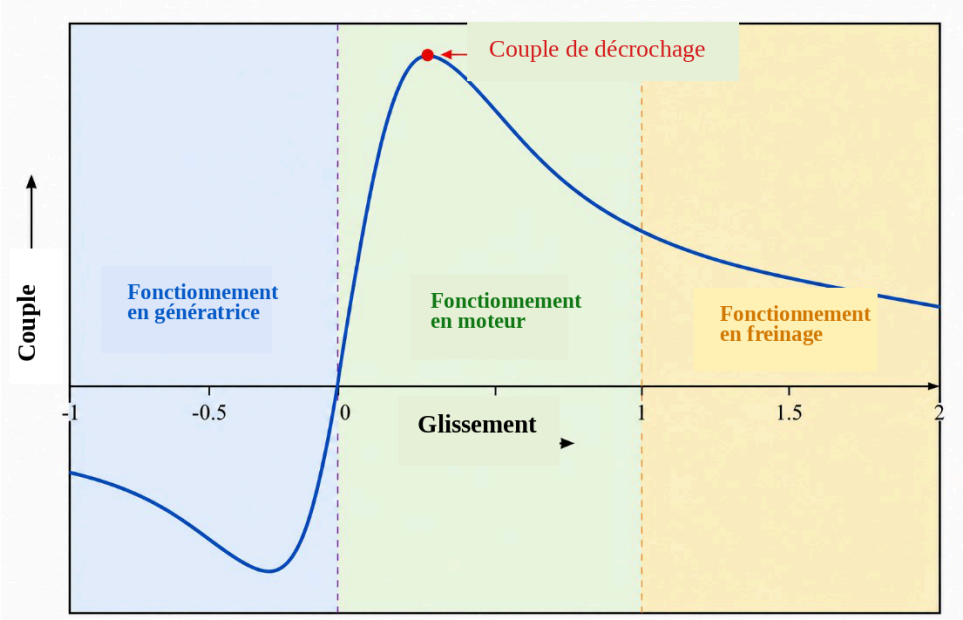


Figure 4.5: Caractéristique couple-vitesse de la machine asynchrone dans trois modes de fonctionnement.

La caractéristique couple-vitesse de la machine asynchrone permet d'en distinguer les modes de fonctionnement. Pour un glissement positif, la machine fonctionne en moteur et convertit une puissance électrique d'entrée en puissance mécanique. Pour un glissement négatif, elle fonctionne en génératrice et convertit une puissance mécanique d'entrée en puissance électrique. À très fort glissement ou en rotation inverse, elle peut fonctionner en zone de freinage, où l'énergie mécanique est absorbée et principalement dissipée sous forme de chaleur. Dans une éolienne, la zone stable de fonctionnement en génératrice est particulièrement importante : la génératrice doit fonctionner en dessous de sa limite de couple de décrochage. Si l'éolienne impose un couple supérieur à la capacité stable de la génératrice, la machine peut devenir instable, absorber un courant excessif, surchauffer et devoir être déconnectée par les protections.

Note technique 1

Pour les génératrices asynchrones raccordées au réseau, celui-ci joue deux rôles majeurs. Premièrement, il fixe la fréquence de fonctionnement : la fréquence électrique de la génératrice est donc verrouillée sur celle du réseau. Deuxièmement, il fournit le courant réactif de magnétisation nécessaire pour établir le flux dans l'entrefer. C'est pourquoi les génératrices asynchrones sont simples et robustes, mais peuvent nécessiter un soutien en puissance réactive, notamment sur les réseaux faibles. En fonctionnement autonome, le besoin de magnétisation doit être fourni localement, le plus souvent par des condensateurs en dérivation raccordés aux bornes de la génératrice. Sans excitation suffisante, la génératrice asynchrone ne peut ni établir ni maintenir sa tension aux bornes. La production de tension ne dépend donc pas seulement de la rotation mécanique : elle exige aussi une excitation magnétique et un équilibre approprié de puissance réactive.

En résumé, la production d'électricité dans une éolienne résulte de l'interaction entre la rotation mécanique, le flux magnétique, la tension induite, les courants du rotor et du stator, le glissement et le couple électromagnétique. La puissance mécanique du vent entraîne l'arbre de la génératrice ; le mouvement relatif entre les champs magnétiques et les conducteurs induit une tension ; les courants induits ou fournis interagissent avec le flux magnétique pour produire un couple électromagnétique ; enfin, l'équilibre entre le couple de l'éolienne et le couple de la génératrice détermine le point de fonctionnement. Le chapitre 6 montre que la génératrice asynchrone est particulièrement adaptée à l'éolien parce qu'elle est robuste, sans balais, relativement peu coûteuse et capable de convertir la puissance mécanique de l'éolienne en puissance électrique injectée au réseau lorsqu'elle fonctionne au-dessus de la vitesse synchrone. Son comportement théorique s'explique notamment par la loi de Faraday, la vitesse synchrone, le glissement, le schéma équivalent et les caractéristiques couple-vitesse.

3 Configurations courantes de génératrices éoliennes

Les configurations de génératrices sont choisies en fonction de la plage de vitesse requise, de la méthode de raccordement au réseau, de la taille de l'éolienne, de la conception mécanique de la chaîne cinématique, de l'objectif de fiabilité et du coût. Cette section traite des DFIG, des PMSG, des systèmes à entraînement direct et à multiplicateur, ainsi que des avantages et limites de chaque configuration. Le choix du groupe générateur-entraînement est déterminant, car le rotor de l'éolienne tourne généralement beaucoup plus lentement qu'une génératrice conventionnelle. La plupart des systèmes exigent donc soit un multiplicateur pour accroître la vitesse de la génératrice, soit une génératrice spéciale à faible vitesse capable de fonctionner directement à la vitesse de l'éolienne.

3.1 Génératrice asynchrone à double alimentation (DFIG)

Une génératrice asynchrone à double alimentation (DFIG) est une machine asynchrone à rotor bobiné dont le stator est directement raccordé au réseau, tandis que le rotor est relié, par des bagues collectrices, à un convertisseur électronique de puissance à fréquence variable (voir figure 4.6). Cette disposition est décrite comme un entraînement Scherbius à vitesse variable, également appelé machine asynchrone à double alimentation, car la puissance électrique s'échange à travers les circuits du stator et du rotor. Le stator fournit la puissance à la fréquence du réseau, tandis que le circuit rotorique reçoit ou fournit la puissance de glissement en fonction de la vitesse de fonctionnement. L'injection dans le rotor d'une tension commandée à la fréquence de glissement requise permet de faire varier la vitesse de la machine tout en maintenant le stator synchronisé avec le réseau.

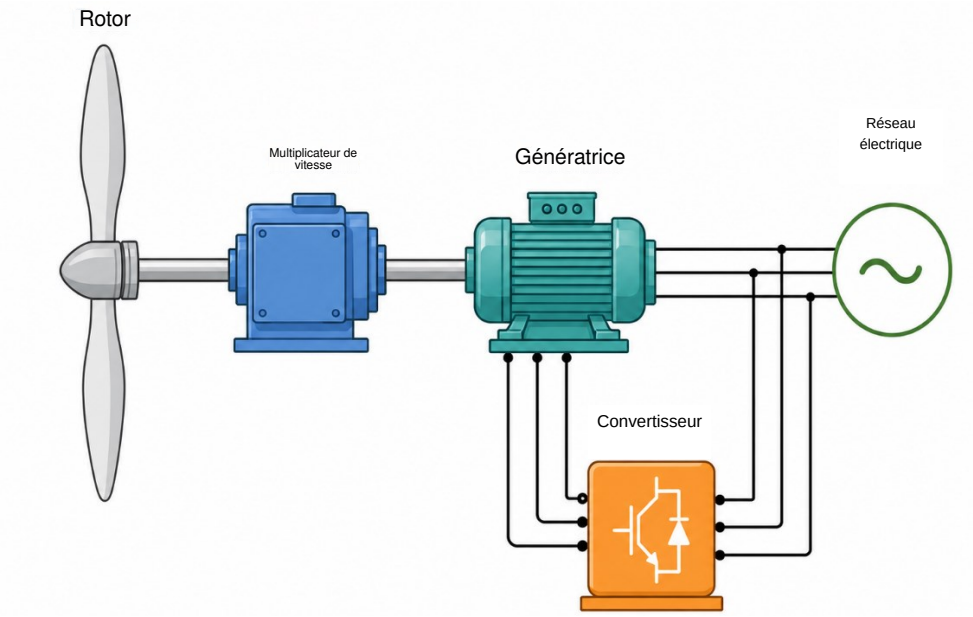


Figure 4.5: L'entraînement Scherbius à vitesse réglable injecte une tension de fréquence variable dans le circuit du rotor bobiné.
circuit rotor.

La base théorique du fonctionnement d'une DFIG repose sur le principe du glissement d'une machine asynchrone. Dans une génératrice asynchrone classique, le rotor doit tourner légèrement au-dessus de la vitesse synchrone pour

pour alimenter le réseau. Le glissement a été défini à l'équation (4.4). En fonctionnement en génératrice, $N_r > N_s$, de sorte que le glissement devient négatif. Une valeur absolue plus élevée du glissement entraîne un courant rotorique plus important et une conversion électromécanique accrue, mais augmente aussi les pertes rotoriques et les besoins de refroidissement. Dans une DFIG, le convertisseur côté rotor commande volontairement ce comportement de glissement. Au lieu de laisser la génératrice fonctionner uniquement dans l'étroite plage naturelle de glissement d'une génératrice asynchrone à vitesse fixe, le convertisseur impose l'amplitude, la fréquence et l'angle de phase du courant rotorique requis pour la captation d'énergie à vitesse variable.

Note technique 2

L'architecture DFIG est intéressante parce que le convertisseur de puissance ne traite généralement pas la totalité de la puissance de sortie de la génératrice ; il traite principalement la puissance de glissement qui transite par le circuit rotorique. Cela permet de réduire la taille, le coût et les pertes du convertisseur par rapport aux architectures à convertisseur pleine puissance. La DFIG offre ainsi de nombreux avantages du fonctionnement à vitesse variable tout en conservant un convertisseur relativement compact. Le fonctionnement à vitesse variable est important parce que le coefficient de puissance du rotor atteint son maximum uniquement à un rapport de vitesse en bout de pale optimal ; si la vitesse du vent varie alors que la vitesse du rotor reste fixe, l'éolienne s'éloigne de son rendement aérodynamique maximal. L'adaptation de la vitesse de la génératrice à la vitesse du vent permet donc d'accroître la production annuelle d'énergie.

3.2 Génératrice synchrone à aimants permanents (PMSG)

Une génératrice synchrone à aimants permanents (PMSG) utilise des aimants permanents sur le rotor pour créer le champ d'excitation, tandis que le stator contient les enroulements d'induit dans lesquels la tension est induite. Contrairement à une génératrice synchrone à excitation bobinée, la PMSG n'exige ni enroulement d'excitation continu séparé, ni alimentation de courant d'excitation, ni bagues collectrices, ni balais pour l'excitation rotorique. Elle est donc intéressante pour les applications éoliennes où la réduction de la maintenance et une grande fiabilité sont des objectifs majeurs.

Les machines à aimants permanents sont abordées dans deux contextes pertinents. Premièrement, dans les petits systèmes éoliens, elles peuvent simplifier le fonctionnement, en particulier lorsqu'une sortie locale continue ou redressée est acceptable. Deuxièmement, pour les systèmes à entraînement direct, les machines synchrones à aimants permanents ou à rotor bobiné constituent des solutions possibles de génératrices lentes à grand nombre de pôles. C'est la base théorique de l'utilisation des PMSG dans les éoliennes modernes à entraînement direct : les aimants permanents fournissent le flux d'entrefer sans pertes cuivre au rotor, tandis que le grand nombre de pôles permet de produire une fréquence électrique à faible vitesse mécanique. Une PMSG produit une fréquence électrique proportionnelle à la vitesse mécanique et au nombre de pôles, conformément à l'équation (4.2).

Dans une génératrice synchrone directement raccordée au réseau, cette relation imposerait une vitesse synchrone fixe au rotor. Or la vitesse du vent varie en permanence ; une PMSG utilisée dans une éolienne moderne à vitesse variable est donc normalement raccordée au réseau par un

convertisseur pleine puissance. Le convertisseur côté génératrice redresse ou commande la sortie à fréquence variable, tandis que l'onduleur côté réseau produit un courant alternatif à fréquence fixe compatible avec le réseau. Le concept général de vitesse variable et de fréquence constante consiste à convertir, au moyen de l'électronique de puissance, une sortie de génératrice à tension et fréquence variables en une puissance à tension et fréquence fixes (voir figure 4.6).

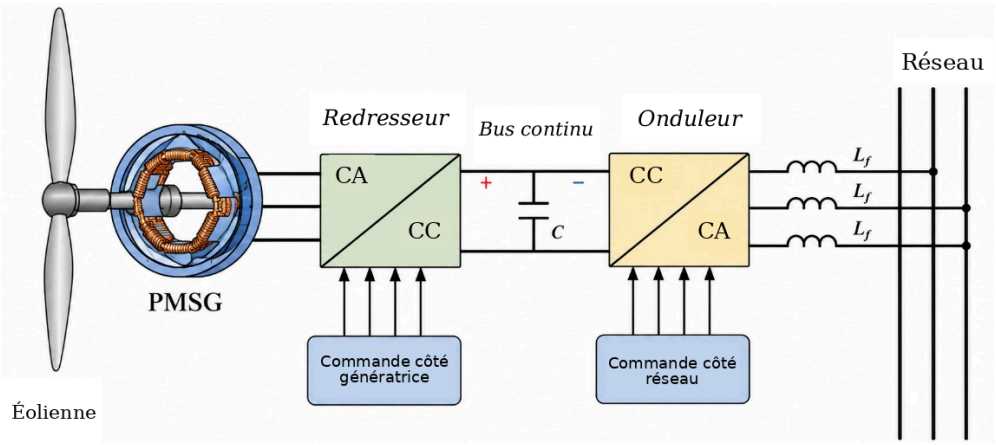


Figure 4.6: Schéma du système d'énergie éolienne à vitesse variable à fréquence constante.

Les systèmes PMSG présentent donc un rendement élevé et sont mécaniquement intéressants, notamment pour les éoliennes à vitesse variable et à entraînement direct. Ils exigent toutefois une conception rigoureuse du convertisseur, de la thermique et du circuit magnétique, ainsi qu'une évaluation des coûts.

3.3 Entraînement direct et systèmes à multiplicateur

Le choix entre un système à entraînement direct et un système à multiplicateur est l'une des décisions les plus importantes concernant la chaîne cinématique dans la conception électrique d'une éolienne. Le rotor tourne normalement à faible vitesse : les grands rotors de classe mégawatt peuvent ne tourner qu'à quelques dizaines de tours par minute. Les génératrices conventionnelles, notamment les génératrices asynchrones à fréquence réseau, fonctionnent efficacement à des vitesses beaucoup plus élevées. Les vitesses données en exemple pour des génératrices asynchrones raccordées au réseau sont supérieures à 3 600 tr/min pour une machine bipolaire à 60 Hz, 1 800 tr/min pour une machine quadripolaire et 1 200 tr/min pour une machine à six pôles. Cet écart

explique l'emploi habituel d'un multiplicateur entre le rotor et la génératrice. Dans un système à multiplicateur, le rotor entraîne un multiplicateur qui élève sa faible vitesse à une vitesse supérieure de la génératrice. Il est ainsi possible d'utiliser des génératrices plus petites, plus légères et plus rapides. Les éoliennes traditionnelles à génératrice asynchrone et vitesse fixe utilisaient cette disposition, car la machine asynchrone fonctionne naturellement près de la vitesse synchrone. Patel explique que le fonctionnement à vitesse fixe convient bien à la génératrice asynchrone, mais que la vitesse de l'éolienne est faible et que la génératrice fonctionne

plus efficacement à grande vitesse ; l'adaptation est donc réalisée par engrenages mécaniques. Le principal avantage de ce système est que la génératrice peut être plus petite et moins coûteuse et reposer sur des technologies éprouvées de machines asynchrones ou synchrones. Les concepteurs peuvent également sélectionner des rapports de transmission qui font correspondre les

caractéristiques aérodynamiques de l'éolienne à celles de la génératrice. Note technique 3 Le *multiplicateur introduit des pertes, de l'usure mécanique, des besoins de lubrification, des vibrations, du bruit acoustique et des besoins de maintenance. Il est explicitement indiqué que l'engrenage mécanique dégrade quelque peu le rendement et la fiabilité. Les défaillances du multiplicateur sont aussi coûteuses, car il est situé dans la nacelle, où l'accès et le remplacement sont difficiles.*

Dans un système à entraînement direct, la génératrice est directement accouplée au rotor, sans multiplicateur. Elle doit donc fonctionner à la même faible vitesse que le rotor. Pour produire la fréquence électrique requise à cette vitesse, la machine doit posséder de nombreux pôles ou utiliser l'électronique de puissance pour découpler la fréquence de la génératrice de celle du réseau. Patel qualifie l'entraînement direct d'« extrêmement intéressant », car il supprime l'engrenage mécanique et peut réduire le bruit, les vibrations, les pertes de puissance et l'entretien de la nacelle.

La limite tient au fait que les génératrices lentes à entraînement direct doivent être physiquement grandes et électromagnétiquement complexes. Un grand nombre de pôles impose un faible pas polaire, ce qui peut compliquer la conception magnétique. Patel indique que les machines synchrones à aimants permanents, les machines synchrones à rotor bobiné et les machines asynchrones à entrefer axial ont été envisagées pour surmonter ces limites dans les grandes génératrices à entraînement direct. L'entraînement direct peut donc améliorer la fiabilité mécanique, mais reporte la difficulté de conception sur la machine électrique et le convertisseur.

Tableau 4.1: Avantages et limites des différentes configurations de génératrices éoliennes.

Configuration	Principaux avantages	Principales limites
Génératrice asynchrone à vitesse fixe et multiplicateur	Conception simple et robuste ; faible coût de la génératrice ; technologie largement utilisée et bien maîtrisée ; absence de système séparé d'excitation continue ; construction sans balais à rotor en cage d'écureuil ; maintenance relativement faible pour la génératrice elle-même.	Flexibilité de vitesse limitée ; ne capte pas la puissance aérodynamique maximale sur une vaste plage de vitesses du vent ; dépend d'un multiplicateur pour l'adaptation de vitesse ; le multiplicateur ajoute pertes, bruit, vibrations, besoins de lubrification et de maintenance.
Génératrice asynchrone à double alimentation (DFIG)	Autorise un fonctionnement à vitesse variable ; améliore la captation annuelle par rapport aux systèmes à vitesse fixe ; utilise un convertisseur de puissance partielle, dont le coût et les pertes sont inférieurs à ceux d'un système pleine puissance ; le stator peut être directement raccordé au réseau.	Exige un rotor bobiné et des bagues collectrices, qui augmentent la maintenance ; commande et protection plus complexes ; plage de vitesse plus limitée que celle d'un système pleine puissance ; sensibilité aux perturbations du réseau du fait du raccordement direct du stator.
Génératrice synchrone à aimants permanents (PMSG)	Rendement élevé grâce à la suppression des pertes d'excitation au rotor ; absence d'enroulement d'excitation, de balais et d'alimentation continue externe ; adaptée à la vitesse variable ; fonctionne bien avec un convertisseur pleine puissance ; intéressante pour l'entraînement direct.	Exige généralement un convertisseur pleine puissance ; coût, pertes, refroidissement et filtrage harmonique du convertisseur à prendre en compte ; coût élevé des matériaux magnétiques ; risque de sensibilité thermique ou de démagnétisation ; les grandes PMSG à entraînement direct peuvent être lourdes et coûteuses.
PMSG à multiplicateur / système à multiplicateur et convertisseur pleine puissance	Génératrice plus petite et plus légère qu'en entraînement direct ; vitesse variable possible ; les aimants permanents améliorent le rendement ; le multiplicateur permet une vitesse de génératrice plus élevée ; le convertisseur pleine puissance assure une bonne commande de l'interface réseau.	Dépend toujours du multiplicateur : usure et maintenance mécaniques subsistent ; le convertisseur traite toute la puissance produite ; coût du convertisseur supérieur à celui d'une DFIG ; commande électrique plus complexe que celle d'un système asynchrone à vitesse fixe.
Système à génératrice en entraînement direct	Supprime le multiplicateur ; réduit les pertes, vibrations, bruit, lubrification et maintenance associés ; améliore la fiabilité mécanique ; intéressant pour les grandes éoliennes et les applications en mer où l'accès de maintenance est difficile.	La génératrice doit fonctionner à très faible vitesse, ce qui exige de nombreux pôles et un grand diamètre ; machine potentiellement lourde et coûteuse ; conception électromagnétique et structurelle plus complexe ; exige généralement une électronique pleine puissance pour être compatible avec le réseau.
PMSG à entraînement direct	Associe suppression du multiplicateur et excitation efficace par aimants permanents ; ni multiplicateur ni pertes d'excitation au rotor ; bonnes performances à vitesse variable ; maintenance mécanique réduite ; option solide pour les grandes éoliennes modernes.	Génératrice grande et lourde ; coût élevé des aimants ; convertisseur pleine puissance requis ; gestion thermique importante ; fabrication et transport difficiles pour les très grandes machines.

4 Vue d'ensemble des composants électriques

Les composants électriques forment le chemin pratique de fourniture de puissance entre les bornes de la génératrice et le réseau externe. Après la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique, la puissance produite doit être conditionnée, transmise, commutée, protégée et finalement fournie au réseau collecteur du parc ou au réseau public. Dans un système complet, la génératrice et le convertisseur ne sont qu'une partie de l'ensemble : les transformateurs, câbles de puissance, appareillages, équipements de mise à la terre, disjoncteurs, relais, parafoudres et dispositifs de protection contre les défauts sont tout aussi importants pour une production sûre et fiable. Le programme du cours identifie les transformateurs, câbles, appareillages et systèmes de protection comme les principaux composants de cette partie, en insistant sur l'élévation de la tension, la transmission dans l'éolienne et vers le réseau, et la protection contre les surintensités, les défauts à la terre et les autres situations anormales.

4.1 Transformateurs : élévation de tension pour le raccordement au réseau

Le transformateur est l'un des composants électriques les plus importants de la chaîne de transfert de puissance d'une éolienne (voir figure 4.1). La génératrice produit généralement l'électricité à une tension relativement basse ou moyenne, selon la puissance nominale de l'éolienne et la conception de la génératrice. Or, le transport d'une puissance élevée à basse tension exigerait un courant important. Un courant élevé accroît les pertes dans les conducteurs selon $P_{pertes} = I^2R$, où P_{pertes} représente les pertes résistives, I le courant et R la résistance du conducteur. À puissance transmise identique, l'élévation de la tension réduit donc le courant et les pertes dans les câbles. C'est la raison principale pour laquelle les éoliennes utilisent des transformateurs élévateurs avant de transmettre la puissance par la tour, le réseau collecteur, le poste électrique ou le point d'interconnexion au réseau.

Selon la conception et la stratégie de maintenance, le transformateur peut se trouver dans la nacelle, à la base de la tour, à côté de celle-ci ou dans une enceinte voisine montée sur socle. Sa fonction première consiste à adapter la tension côté génératrice ou convertisseur à celle du réseau collecteur du parc. La génératrice ou le convertisseur peut, par exemple, fonctionner à une tension plus faible, tandis que le réseau collecteur fonctionne à moyenne tension pour transmettre la puissance de plusieurs éoliennes vers un poste. À l'échelle du parc, un transformateur de poste plus grand peut ensuite élever une nouvelle fois la tension pour le transport vers le réseau public (voir figure 4.7). Les parcs éoliens comprennent donc des infrastructures électriques : réseaux collecteurs, postes, transformateurs, lignes de transport, niveaux de tension et exigences de raccordement.

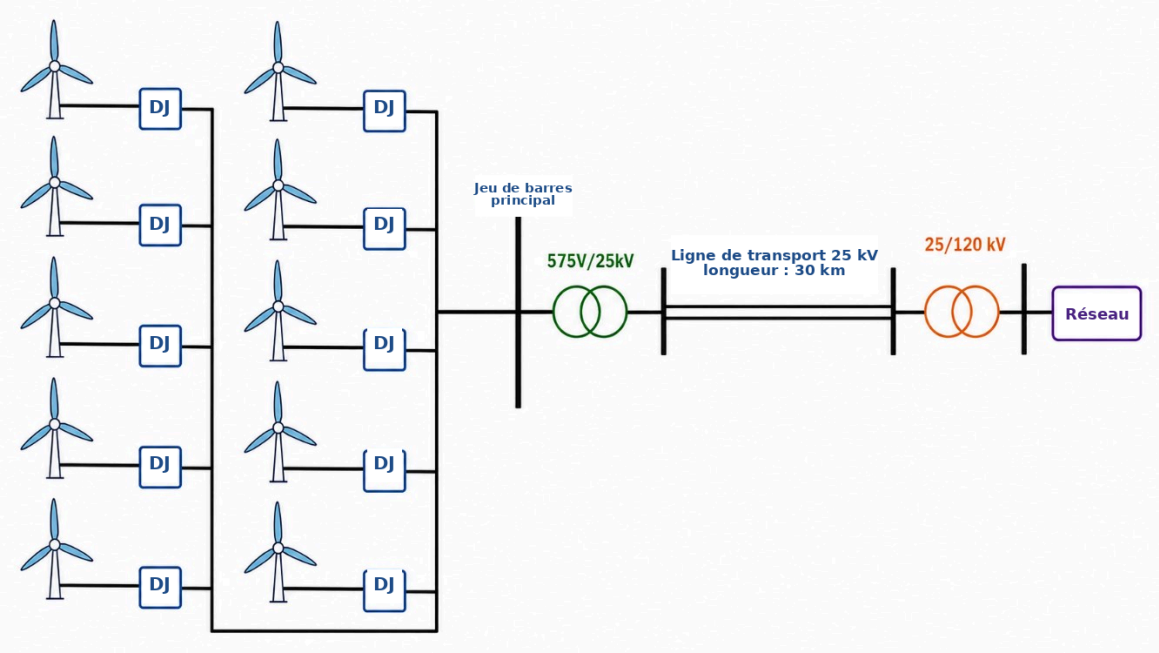


Figure 4.7: Configuration des transformateurs élévateurs de tension dans un parc éolien.

Du point de vue théorique, le transformateur transmet la puissance alternative par induction électromagnétique. Le rapport des tensions est approximativement égal au rapport du nombre de spires :

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1} \tag{4.7}$$

où V_1 et V_2 sont les tensions primaire et secondaire, et N_1 et N_2 les nombres de spires correspondants. Dans un transformateur élévateur, l'enroulement secondaire comporte davantage de spires que l'enroulement primaire, de sorte que la tension de sortie est supérieure à la tension d'entrée. Idéalement, la puissance se conserve :

$$V_1 I_1 \approx V_2 I_2 \tag{4.8}$$

Par conséquent, lorsque la tension augmente, le courant diminue. Cette propriété est essentielle dans les systèmes éoliens, car un courant plus faible réduit la section des conducteurs, les contraintes thermiques, la chute de tension et les pertes résistives. Le dimensionnement du transformateur doit également prendre en compte le rendement, le niveau d'isolation, la charge thermique, les harmoniques, le courant de défaut et l'exposition aux conditions environnementales. Dans les éoliennes équipées de convertisseurs, les formes d'onde de courant et de tension peuvent contenir des composantes harmoniques. Les harmoniques ne fournissent pas de puissance utile, mais augmentent les pertes I^2R et donc l'échauffement des génératrices, des moteurs et des transformateurs ; le dimensionnement thermique du transformateur est par conséquent important dans les systèmes d'énergie renouvelable.

4.2 Câbles et appareillage : transmission de la puissance dans l'éolienne et vers le réseau

4.2.1 Câbles

Les câbles assurent la liaison électrique physique entre la génératrice, le convertisseur, le transformateur, l'appareillage, la base de la tour, le réseau collecteur du parc et l'interface réseau. Dans la nacelle, ils transportent la puissance de la génératrice vers le convertisseur ou le transformateur. Dans la tour, des tronçons souples et fixes transmettent la puissance vers l'armoire électrique ou le transformateur de base. À l'extérieur, des câbles collecteurs enterrés ou aériens transportent la puissance de chaque éolienne jusqu'au poste. Le système de câblage doit donc être conçu en fonction du courant admissible, de l'isolation en tension, des conditions thermiques, des mouvements mécaniques, de la

compatibilité électromagnétique et de la tenue aux défauts. Note technique 4 Le dimensionnement *ne consiste pas seulement à transporter le courant nominal. Il doit également tenir compte de la chute de tension, de l'élévation de température, du courant de court-circuit, de la méthode d'installation, de la température ambiante, du regroupement des câbles et des pertes en fonctionnement continu. Dans une éolienne, le cheminement est techniquement difficile, car la nacelle tourne pour suivre la direction du vent. Certains câbles de puissance et de commande doivent donc supporter torsion, flexion et vibrations. Les câbles de la tour doivent être mécaniquement soutenus afin d'éviter la fatigue, la détérioration de l'isolation et des contraintes excessives sur les bornes.*

À l'échelle du parc, le réseau de câbles collecteurs se comporte comme une partie de l'interface réseau. Sa résistance et sa réactance contribuent à la régulation de la tension, aux pertes de puissance et au comportement en défaut. La ligne qui relie un site renouvelable au réseau public impose des limites d'exploitation du fait de la régulation de tension et de la puissance maximale transmissible. L'impédance de la ligne influe sur la chute de tension, le comportement en charge et l'interaction avec le réseau. En pratique, la longueur des câbles, la section des conducteurs, le niveau de tension et la topologie du réseau influencent directement le rendement et la qualité de l'électricité.

4.2.2 Appareillage de coupure et de protection

L'appareillage sert à connecter, déconnecter, isoler et protéger les circuits électriques. Dans une éolienne, il peut comprendre des sectionneurs, des contacteurs, des interrupteurs-sectionneurs, des fusibles, des disjoncteurs, des sectionneurs de terre et des tableaux moyenne tension. Il permet un fonctionnement sûr pendant le démarrage, l'arrêt, la maintenance, l'isolement d'un défaut et la déconnexion d'urgence. Il permet aussi de séparer électriquement l'éolienne du réseau collecteur lorsque du personnel de maintenance intervient sur le système.

L'appareillage doit être dimensionné pour le courant et la tension en régime normal, le pouvoir de coupure, le courant de court-circuit, le niveau d'isolation et les conditions environnementales. En cas de défaut, les disjoncteurs doivent interrompre le courant avant que les câbles, transformateurs ou génératrices ne dépassent leurs limites thermiques et mécaniques. Dans un parc comprenant de nombreuses éoliennes,

l’appareillage permet également d’isoler une machine défaillante sans déconnecter toute la centrale. Cela améliore la disponibilité et réduit la perte d’énergie (voir figure 4.7, où les disjoncteurs assurent ces opérations).

4.3 Systèmes de protection: surintensité, mise à la terre et protection contre les défauts

Les systèmes de protection sont nécessaires pour assurer la sécurité de l’éolienne, du réseau et des personnes dans des conditions électriques anormales. Une éolienne peut subir une surintensité, un court-circuit, un défaut à la terre, une défaillance d’isolation, une surtension due à la foudre, un défaut du convertisseur, du transformateur ou d’un câble, un creux de tension du réseau, un écart de fréquence, une surchauffe ou une perte du réseau. Le système de protection doit détecter rapidement ces événements et soit déconnecter le composant concerné, soit commander l’arrêt sûr de l’éolienne.

La protection contre les surintensités est utilisée lorsque le courant dépasse la limite de sécurité d'utilisation d'un composant. Un excès de courant peut survenir en raison de courts circuits, de surcharges, d'un mauvais fonctionnement du convertisseur, de défaillances du transformateur, d'une défaillance de l'isolation des câbles ou d'un fonctionnement anormale de la génératrice. Les dispositifs de protection tels que les fusibles, les disjoncteurs et les relais de protection interrompent le courant avant que le chauffage excessif ou les forces électromagnétiques endommagent l'équipement. Comme le chauffage est proportionnel à I2R, même un courant élevé de courte durée peut créer une contrainte thermique sévère. Dans les systèmes à moyenne tension, une coordination de protection est nécessaire pour que le dispositif de protection le plus proche fonctionne en premier, en isolant uniquement la section défectueuse.

La mise à la terre est un autre élément fondamental. Elle offre un chemin de faible impédance permettant au courant de défaut et au courant de foudre de s’écouler en sécurité vers la terre. Elle stabilise aussi la tension du système par rapport à la terre et réduit les risques liés aux tensions de contact et de pas. Dans une éolienne, la mise à la terre relie le châssis de la nacelle, la structure de la tour, le bâti de la génératrice, la cuve du transformateur, l’armoire du convertisseur, l’enveloppe de l’appareillage, les écrans des câbles, les récepteurs de foudre et le réseau de terre de la fondation. Une liaison équipotentielle correcte est essentielle, car les courants de foudre et de défaut peuvent créer des différences de potentiel dangereuses entre les parties métalliques.

La protection contre les défauts à la terre détecte le courant qui s’écoule des conducteurs actifs vers la terre. Ce phénomène peut se produire lors d’une défaillance de l’isolation d’un enroulement de la génératrice, d’un câble, d’un transformateur, d’un convertisseur ou d’un élément de l’appareillage. Un défaut à la terre peut commencer par un faible courant de fuite, puis évoluer vers un défaut grave s’il n’est pas détecté. Des relais de défaut à la terre, capteurs de courant résiduel, dispositifs de surveillance de l’isolement et configurations de mise à la terre du neutre sont utilisés pour l’identifier et l’isoler. Le programme avancé de structure électrique identifie également la protection contre les défauts à la terre, la protection contre les surintensités et les courts-circuits, la protection contre les surtensions, la coordination des relais et les disjoncteurs parmi les sujets essentiels.

La protection est particulièrement importante pendant les perturbations du réseau. Patel explique que les systèmes renouvelables raccordés au réseau public doivent se déconnecter en toute sécurité dans certaines situations, notamment une panne du réseau, une fréquence anormale ou une déconnexion d’urgence. L’ouvrage souligne qu’ils ne doivent pas injecter de puissance dans une ligne publique

hors tension, car cela peut mettre en danger les équipes de réparation. Il traite aussi du risque d'auto-excitation des génératrices asynchrones si des condensateurs ou la capacité de la ligne restent raccordés, ce qui rend la conception des protections importante après la déconnexion du réseau.

La protection contre la foudre et les surtensions est également critique, car les éoliennes sont des structures hautes et exposées. Le système doit conduire le courant de foudre par un chemin planifié au lieu de le laisser traverser les roulements, les enroulements de la génératrice, les circuits du convertisseur, l'isolation du transformateur ou l'électronique de commande. Des parafoudres, éclateurs, câbles blindés, conducteurs de terre, tresses de liaison et une coordination correcte de l'isolation servent à réduire les dommages. Patel indique que la protection contre la foudre limite les dommages mécaniques et thermiques aux pales et aux systèmes électriques, et que les niveaux d'isolation de la génératrice et du transformateur doivent être choisis en fonction du risque de foudre.

Résumé de la séance

Cette séance a présenté la structure électrique principale des éoliennes en se concentrant sur la conversion de la rotation mécanique du rotor et de la chaîne cinématique en puissance électrique utilisable. Les apprenants ont étudié le sous-système électrique comme un chemin intégré de conversion comprenant la génératrice, le convertisseur, le transformateur, les câbles, l'appareillage, les dispositifs de protection, les capteurs, les systèmes de refroidissement et d'isolation et les unités de commande. La séance a aussi expliqué l'interaction entre les systèmes mécaniques, électriques et de commande, montrant que la vitesse du vent, la vitesse du rotor, le couple de la génératrice, la tension, le courant, la fréquence, les vibrations, la température et la puissance produite doivent être surveillés et coordonnés pour assurer un fonctionnement stable et efficace. La figure 4.1 illustre cette interaction en présentant, dans la nacelle, le rotor, le multiplicateur, la génératrice, le convertisseur, le transformateur, le disjoncteur, le dispositif de protection contre les surtensions, les capteurs et l'armoire de commande.

La séance a également traité les principes fondamentaux de la production d'électricité, notamment l'induction électromagnétique, les lois de Faraday et de Lenz, la vitesse synchrone, le glissement, la modélisation par schéma équivalent et le comportement couple-vitesse des machines asynchrones. Les apprenants ont examiné des configurations courantes comme les génératrices asynchrones à vitesse fixe, les DFIG, les PMSG, les systèmes à multiplicateur, les systèmes à entraînement direct et les configurations à convertisseur pleine puissance, avec leurs principaux avantages et limites. La dernière partie a porté sur les composants électriques pratiques : transformateurs élévateurs, câbles de puissance, appareillage, systèmes de mise à la terre, protection contre les surintensités, protection contre les défauts et protection contre les surtensions. À la fin de la séance, les apprenants doivent comprendre comment les systèmes électriques des éoliennes convertissent, conditionnent, protègent et fournissent l'énergie au réseau tout en maintenant le rendement, la fiabilité, la qualité de l'électricité et la sécurité d'exploitation.

Électronique de puissance dans la production d'énergie éolienne

Objectifs d'apprentissage

- Expliquer le rôle fondamental de l'électronique de puissance dans les systèmes éoliens et sa fonction dans la conversion de l'énergie électrique, la commande de puissance et le raccordement au réseau.
- Identifier les principaux composants d'électronique de puissance utilisés dans les éoliennes, notamment les redresseurs, les onduleurs, les convertisseurs, les composants de commutation et les composants du bus continu, et expliquer leur rôle dans la production éolienne.

  Présenter les applications courantes de l'électronique de puissance dans les différentes configurations d'éoliennes et comprendre les principaux types de systèmes éoliens fondés sur leurs interfaces électroniques de puissance.
- Décrire le processus fondamental de conversion de l'énergie électrique dans une éolienne, notamment la conversion CA-CC-CA, le flux d'énergie et l'interface entre la génératrice et le réseau électrique.
- Comprendre les notions fondamentales de commande utilisées dans les systèmes d'électronique de puissance, notamment les principes de commutation et de modulation ainsi que les méthodes élémentaires de réglage de la tension et de la fréquence.

Résumé

Cette séance, intitulée « Électronique de puissance dans la production d'énergie éolienne », présente les technologies essentielles d'électronique de puissance qui permettent aux éoliennes modernes de fonctionner de manière efficace et fiable. Les apprenants étudieront comment la puissance électrique des génératrices éoliennes est conditionnée, régulée et fournie au réseau public dans des conditions de fonctionnement variables. Le cours traite des principaux dispositifs électroniques de puissance, notamment les redresseurs, les onduleurs, les convertisseurs et les composants de commutation utilisés pour gérer les flux de puissance et soutenir les performances de l'éolienne. Différentes architectures et leurs caractéristiques de fonctionnement sont également présentées afin de montrer comment les systèmes électroniques améliorent la captation d'énergie et la flexibilité d'exploitation. La séance fournit en outre des notions simples de commande liées à la commutation, à la régulation de la tension et à la commande de la fréquence.

1 Introduction à l'électronique de puissance dans l'énergie éolienne

1.1 Vue d'ensemble de l'électronique de puissance

L'électronique de puissance est une technologie importante des systèmes électriques et énergétiques modernes. Elle a connu un développement rapide au cours des dernières décennies grâce aux progrès des composants semi-conducteurs et des microprocesseurs. Ces évolutions ont amélioré les performances, la vitesse et les possibilités de commande des systèmes électroniques tout en réduisant leur taille et leur coût. L'électronique de puissance est donc aujourd'hui largement utilisée dans les systèmes d'énergie renouvelable, les équipements industriels, les entraînements électriques et les applications de puissance.

Sa fonction principale consiste à commander et à convertir efficacement l'énergie électrique au moyen de composants électroniques de commutation. Elle permet notamment de convertir une puissance alternative en puissance continue, de reconvertir le continu en alternatif et de régler les niveaux de tension et de fréquence. Trois facteurs majeurs interviennent dans la conception et l'exploitation de ces systèmes : la fiabilité, le rendement et le coût. La fiabilité est essentielle, car ils fonctionnent souvent en continu dans des conditions électriques et environnementales variables. Le rendement est tout aussi critique, puisque les pertes réduisent les performances globales et augmentent la production de chaleur. Le coût des dispositifs a par ailleurs continuellement baissé, rendant ces systèmes plus abordables et accessibles, surtout pour les technologies renouvelables comme l'éolien et le solaire. La croissance rapide de l'électronique de puissance résulte principalement du développement de composants semi-conducteurs de commutation avancés. Les composants modernes comme les IGBT offrent une commande plus facile, une commutation plus rapide et de meilleures performances, ce qui les rend particulièrement adaptés aux applications de forte puissance, notamment aux éoliennes modernes.

1.2 Rôle de l'électronique de puissance dans les systèmes éoliens

Ces dernières années, les progrès de l'électronique de puissance ont considérablement amélioré les performances des systèmes éoliens modernes. Ces technologies contribuent non seulement à réduire les contraintes mécaniques sur les composants et à améliorer l'efficacité de la captation d'énergie, mais permettent aussi aux éoliennes de fonctionner comme des unités de production commandables, mieux intégrables au réseau électrique.

1.2.1 Système de conversion de l'énergie éolienne

Un système de conversion de l'énergie éolienne se compose de plusieurs éléments mécaniques et électriques qui fonctionnent ensemble pour convertir l'énergie du vent en puissance électrique. Ses principaux composants comprennent le rotor, le multiplicateur de vitesse, la génératrice, le transformateur, le convertisseur électronique de puissance et le système de raccordement au réseau, comme l'illustre la figure 5.1.

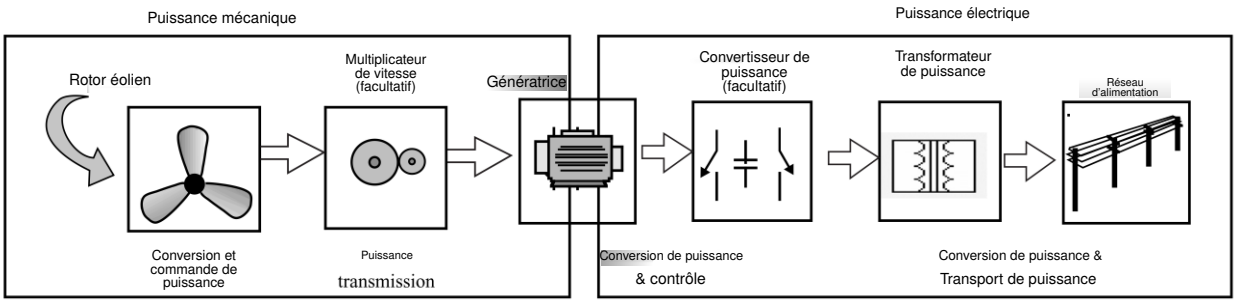


Figure 5.1: Vue d'ensemble des principaux composants mécaniques d'une éolienne.

Les pales captent l'énergie cinétique du vent et la convertissent en énergie mécanique de rotation. La vitesse du vent étant naturellement variable, la vitesse de rotation du rotor change elle aussi en permanence. Dans les grandes éoliennes, le rotor tourne relativement lentement ; un multiplicateur est donc couramment utilisé pour élever la vitesse jusqu'au niveau approprié pour la génératrice. Certains systèmes modernes à génératrice multipolaire peuvent se passer de multiplicateur. La génératrice convertit la puissance mécanique en puissance électrique. L'électricité produite passe ensuite par un transformateur et un convertisseur avant d'être fournie au réseau. Le transformateur élève la tension afin d'assurer un transport efficace et de réduire les pertes. Des dispositifs de protection, des disjoncteurs et des systèmes de surveillance sont également intégrés pour garantir un fonctionnement sûr et fiable.

Comme l'énergie du vent fluctue par nature, la puissance électrique produite est elle aussi variable. Les systèmes modernes exigent donc des dispositifs avancés de commande et de conversion afin de réguler la production, de maintenir un fonctionnement stable et de satisfaire aux exigences de raccordement au réseau.

1.2.2 Importance de l'électronique de puissance dans les systèmes éoliens

L'électronique de puissance est devenue une technologie essentielle des éoliennes modernes. Les premières éoliennes fonctionnaient principalement à vitesse fixe et étaient directement raccordées au réseau. Avec l'évolution des systèmes éoliens et le renforcement des exigences du réseau, l'électronique de puissance est devenue indispensable pour améliorer les performances, la commandabilité et la qualité de l'électricité. Son rôle principal consiste à commander et à conditionner la puissance électrique produite avant son injection sur le réseau. Les convertisseurs d'électronique de puissance régulent la tension, la fréquence et le flux de puissance afin que la sortie de l'éolienne respecte les exigences du réseau malgré les variations continues du vent. Dans les éoliennes modernes, le convertisseur est généralement placé entre la génératrice et le transformateur et sert d'interface entre l'éolienne et le réseau électrique. Ses deux principales fonctions sont les suivantes :

• **Commande de la fréquence :** l'un des principaux avantages de l'électronique de puissance est la possibilité de commander la fréquence de la génératrice indépendamment de celle du réseau. Cette fonction autorise le fonctionnement à vitesse variable : la vitesse du rotor s'adapte aux conditions de vent. L'éolienne peut ainsi extraire davantage d'énergie et fonctionner avec un meilleur rendement. Les variations de vitesse du vent peuvent en outre être absorbées par les variations de vitesse du rotor, ce qui réduit les contraintes mécaniques sur le multiplicateur et améliore la durée de vie des composants.

• **Caractéristiques d'une centrale commandable :** l'électronique de puissance confère aux éoliennes modernes des caractéristiques proches de celles d'unités de production commandables. La commande des convertisseurs permet de réguler la puissance active et la puissance réactive fournies au réseau selon les besoins du système. Elle améliore la stabilité de la tension, soutient les réseaux faibles et facilite l'intégration des parcs éoliens au système électrique. Les convertisseurs améliorent également la qualité de l'électricité en réduisant le papillotement et en filtrant les harmoniques de faible rang produits pendant le fonctionnement.

Le développement continu des semi-conducteurs et des technologies de conversion a considérablement amélioré les performances et la fiabilité des systèmes éoliens. Les éoliennes modernes à vitesse variable équipées de convertisseurs pleine puissance sont aujourd'hui largement utilisées dans les grands parcs éoliens, car elles offrent un rendement supérieur, une meilleure commandabilité et une meilleure compatibilité avec le réseau.

Note technique 1

Dans une éolienne à vitesse variable, la vitesse de rotation de la génératrice peut varier avec la vitesse du vent. Comme la fréquence de la génératrice varie elle aussi avec la vitesse du rotor, des convertisseurs d'électronique de puissance transforment la sortie électrique à fréquence variable en une sortie stable à la fréquence du réseau avant d'injecter la puissance sur le réseau.

En résumé, l'électronique de puissance est une technologie clé des systèmes éoliens modernes. Elle joue un rôle essentiel dans la conversion, la commande et l'acheminement vers le réseau de la puissance électrique produite par les éoliennes. Un système de conversion de l'énergie éolienne comprend des composants mécaniques et électriques - rotor, multiplicateur, génératrice, transformateur et convertisseur d'électronique de puissance - qui fonctionnent ensemble pour transformer l'énergie du vent en énergie électrique utilisable. Comme la vitesse du vent et la puissance produite varient continuellement, les systèmes d'électronique de puissance doivent réguler la tension, la fréquence et le flux de puissance tout en maintenant un fonctionnement stable et fiable.

2 Principaux composants d'électronique de puissance d'un système éolien

Les composants d'électronique de puissance sont les éléments constitutifs des systèmes modernes de conversion utilisés dans les éoliennes. Ils convertissent, commandent et régulent l'énergie électrique entre la génératrice et le réseau. Dans les applications éoliennes, ils améliorent le rendement de conversion, permettent la vitesse variable et contribuent à maintenir une tension et une fréquence stables lorsque le vent change.

Les systèmes modernes reposent principalement sur des composants semi-conducteurs de commutation. Les progrès continus ont augmenté leurs capacités en tension et en courant tout en réduisant les pertes, en améliorant la fiabilité et en diminuant les coûts. Les convertisseurs actuels sont donc plus compacts, plus efficaces et plus faciles à commander que les systèmes antérieurs. Un système type comprend des redresseurs, des onduleurs, des composants de commutation et des circuits de bus continu. Ensemble, ils transforment la sortie variable de la génératrice en une sortie stable convenant au raccordement au réseau.

2.1 Diodes et composants de commutation

Les diodes comptent parmi les composants semi-conducteurs les plus simples et les plus utilisés. Une diode laisse passer le courant dans un seul sens et le bloque dans l'autre. Elle sert donc principalement au redressement et n'est pas commandable. Les composants de commutation sont des semi-conducteurs qui commandent la

Les composants de commutation sont des semi-conducteurs qui commandent le flux de puissance électrique. Ils établissent et interrompent rapidement le courant afin de permettre un réglage efficace de la tension, du courant et du flux de puissance. On distingue les interrupteurs semi-commandables et les interrupteurs entièrement commandables. Les dispositifs couramment utilisés comprennent les thyristors, les transistors à effet de champ métal-oxyde-semi-conducteur (MOSFET), les transistors bipolaires (BJT), les thyristors blocables par la gâchette (GTO) et les transistors bipolaires à grille isolée (IGBT). Les thyristors sont des interrupteurs semi-commandables commutés par le réseau : un signal de commande les amorce, mais leur blocage dépend du circuit de puissance. Ils consomment de la puissance réactive inductive et ne permettent pas de commander directement la puissance réactive. Les interrupteurs entièrement commandables, utilisés dans les convertisseurs autocommutés, peuvent être mis en conduction et bloqués par des signaux de commande ; ils permettent un échange bidirectionnel de puissance active et réactive. Parmi eux, l'IGBT est l'un des dispositifs les plus importants et les plus répandus dans les convertisseurs d'éoliennes modernes. Le tableau 5.1 compare les différents composants de commutation.

Note technique 2

Un IGBT associe les avantages de deux technologies de transistors : la forte impédance d'entrée et la rapidité de commutation des MOSFET, avec la capacité élevée en courant et en tension des transistors bipolaires. Ces caractéristiques rendent les IGBT adaptés aux applications de moyenne et forte puissance, notamment aux systèmes éoliens. Leur commutation rapide permet une commande précise de la puissance électrique et la mise en œuvre de méthodes avancées de commande des convertisseurs telles que la modulation de largeur d'impulsion (PWM). Les convertisseurs d'éoliennes modernes contiennent généralement de nombreux IGBT regroupés en modules afin de traiter efficacement de fortes puissances électriques.

Tableau 5.1: Applications, avantages et inconvénients des différents composants de commutation.

Type de tour	Applications types	Avantages	Inconvénients
Thyristor	Redresseurs commandés, démarreurs progressifs, systèmes de transport HVDC, commande de puissance industrielle.	Structure simple, faible coût, forte capacité en tension et en courant, faibles pertes de conduction.	Ne peut pas être bloqué directement par un signal de commande ; commandabilité limitée ; consomme de la puissance réactive et produit des harmoniques.
GTO	Entraînements de forte puissance, systèmes de traction, grands convertisseurs industriels.	Amorçable et blocable par un signal de gâchette ; adapté aux fortes puissances ; meilleure commandabilité qu'un thyristor.	Circuit de commande de gâchette complexe ; commutation plus lente ; coût et pertes supérieurs à ceux des composants modernes.
MOSFET	Alimentations à découpage, convertisseurs de faible et moyenne puissance, convertisseurs CC-CC, circuits électroniques.	Commutation très rapide, commande de grille simple, rendement de commutation élevé à basse tension, adapté aux hautes fréquences.	Capacités en tension et en courant plus faibles pour les systèmes de forte puissance ; moins adapté aux très grandes puissances.
IGBT	Convertisseurs d'éoliennes, systèmes renouvelables, entraînements électriques, véhicules électriques, convertisseurs industriels.	Forte capacité en tension et en courant, commutation rapide, commande aisée, adapté aux moyennes et fortes puissances.	Pertes de commutation supérieures à celles des MOSFET ; plus coûteux que les thyristors dans certaines applications.

2.2 Redresseur

Un redresseur est un circuit électronique de puissance qui convertit le courant alternatif (CA) en courant continu (CC). Dans les systèmes éoliens, la puissance électrique produite par la génératrice est souvent convertie en continu avant d'autres opérations de conversion et de commande. Le redressement est donc une étape importante de nombreux convertisseurs. Le type le plus courant est le pont de diodes en raison de sa simplicité, de son faible coût et de sa grande fiabilité. Les redresseurs à diodes n'autorisent toutefois qu'un flux de puissance unidirectionnel et offrent une commande limitée de la tension et du courant. Des systèmes plus avancés peuvent utiliser des composants commandables afin d'améliorer la commande et les performances. Les redresseurs peuvent être monophasés ou triphasés selon la configuration ; les redresseurs triphasés sont courants dans les éoliennes, car les génératrices produisent généralement une puissance alternative triphasée.

2.3 Onduleur

À l'inverse du redresseur, l'onduleur convertit le courant continu en courant alternatif. Après conversion en continu de la puissance produite, l'onduleur la reconvertit en alternatif avec la tension et la fréquence exigées pour le raccordement au réseau. Les onduleurs modernes commandent à la fois la tension et la fréquence de sortie, ce qui permet aux éoliennes de fournir au réseau une puissance stable malgré les variations permanentes du vent et de la vitesse de la génératrice. Ils contribuent également à améliorer la qualité de l'électricité et à soutenir la stabilité du réseau.

Les circuits d'onduleurs peuvent utiliser des thyristors, des GTO, des MOSFET ou des IGBT. Les onduleurs à IGBT sont courants dans les éoliennes modernes en raison de leur commutation rapide, de leur bonne commandabilité et de leur rendement relativement élevé. En pratique, l'onduleur est généralement placé côté réseau et fonctionne avec des circuits de commande et des filtres afin de produire une sortie alternative sinusoïdale régulière.

2.4 Convertisseur de puissance

Le convertisseur de puissance est le terme général désignant un système électronique qui transforme la puissance électrique d'une forme à une autre. Il est essentiel dans les systèmes éoliens, car la sortie de la génératrice est variable et ne peut généralement pas être directement raccordée au réseau. Selon la nature de l'entrée et de la sortie, les convertisseurs se répartissent en plusieurs catégories : convertisseurs CA-CC (redresseurs) ; convertisseurs CC-CA (onduleurs) ; convertisseurs CC-CC (hacheurs) ; convertisseurs CA-CA (convertisseurs de fréquence). La figure 5.2 présente le schéma type d'un convertisseur dans un système éolien. La configuration la plus courante associe un redresseur et un onduleur reliés par un bus continu.

- Convertisseurs CA-CC (redresseurs)
- Convertisseurs CC-CA (onduleurs)
- Convertisseurs CC-CC (hacheurs)
- Convertisseurs CA-CA (convertisseurs de fréquence)

Un schéma type d'un convertisseur de puissance utilisé dans un système de production éolienne est présenté à la figure 5.2. Dans les éoliennes, l'architecture la plus courante associe un redresseur et un onduleur reliés par un bus continu. Le convertisseur côté génératrice traite la puissance électrique produite par la génératrice, tandis que le convertisseur côté réseau commande la puissance injectée sur le réseau.

Les convertisseurs comprennent aussi des filtres, capteurs, systèmes de refroidissement et circuits de protection. Le refroidissement est nécessaire parce que les semi-conducteurs produisent de la chaleur pendant les commutations. Les protections aident à éviter des dommages dans des conditions anormales telles qu'une surtension ou une vitesse excessive du rotor. Les convertisseurs modernes améliorent la captation d'énergie, réduisent les contraintes mécaniques, améliorent la qualité de l'électricité et renforcent la compatibilité avec le réseau.

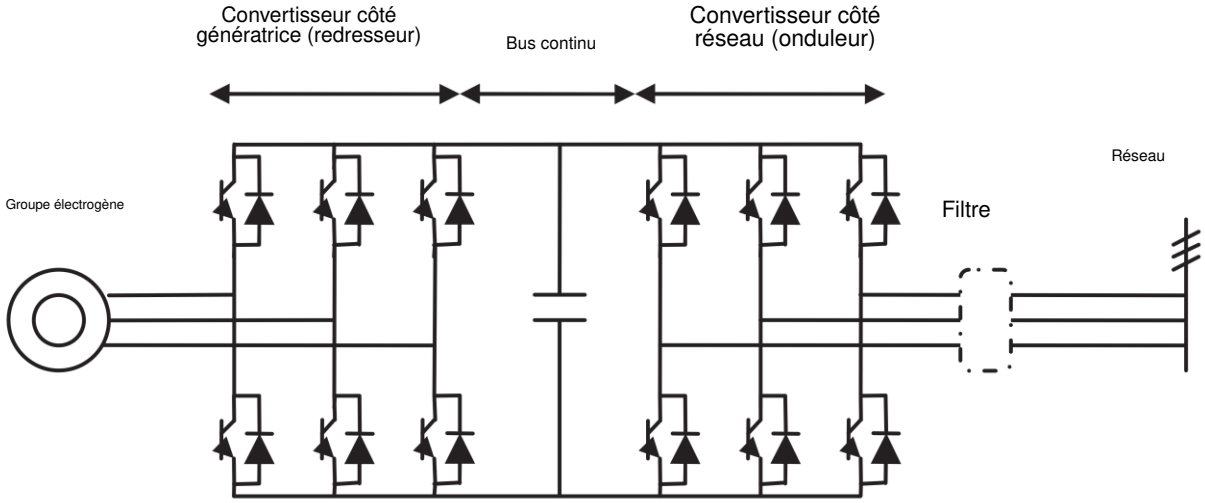


Figure 5.2: Configuration du convertisseur de puissance dans une éolienne

2.5 Composants du bus continu

Le bus continu constitue, dans de nombreux convertisseurs, un étage intermédiaire important entre le redresseur et l'onduleur. Sa fonction principale est de stabiliser la tension continue et de découpler le fonctionnement du convertisseur côté génératrice de celui du convertisseur côté réseau. Il est principalement constitué de condensateurs et parfois d'inductances. Les condensateurs stockent temporairement de l'énergie et contribuent à maintenir une tension continue stable. Ils réduisent aussi les fluctuations provoquées par les commutations et les variations de puissance. Les inductances lissent les variations de courant et réduisent les composantes harmoniques. Ensemble, ces composants améliorent la qualité de l'électricité et réduisent les perturbations.

La stabilité du bus continu est très importante pour le bon fonctionnement du convertisseur, car une tension continue instable peut affecter les performances

de l'onduleur et réduire la fiabilité. Les composants sont donc soigneusement dimensionnés pour les niveaux de tension et de puissance du système. En pratique, des filtres placés près du bus et du convertisseur côté réseau servent également à réduire les harmoniques et à améliorer la qualité de la puissance fournie.

En résumé, les redresseurs, onduleurs, convertisseurs, composants de commutation, condensateurs et inductances fonctionnent ensemble pour convertir et commander efficacement la puissance électrique. Ils permettent un fonctionnement stable, la commande à vitesse variable, une meilleure qualité de l'électricité et une intégration fiable au réseau. Les progrès des semi-conducteurs et des technologies de conversion ont considérablement amélioré le rendement, la commandabilité et la fiabilité des systèmes électroniques de puissance des éoliennes.

3 Conversion et flux de l’énergie électrique dans une éolienne

Dans le processus de conversion d’une éolienne, la puissance est convertie sous deux formes : mécanique et électrique. Le rotor transforme d’abord l’énergie cinétique du vent en énergie mécanique de rotation selon les principes aérodynamiques. La génératrice transforme ensuite l’énergie mécanique en énergie électrique. La figure 5.1 illustre ce flux global.

Après la production électrique, des convertisseurs peuvent être utilisés selon la configuration. Sur une éolienne à vitesse fixe, la génératrice peut être directement raccordée au réseau. Les éoliennes modernes fonctionnent toutefois principalement à vitesse variable, et les convertisseurs jouent un rôle essentiel dans l’intégration au réseau et la régulation de la puissance. L’électronique de puissance est ainsi devenue une technologie clé. Dans une éolienne à vitesse variable, la sortie alternative de la génératrice est d’abord convertie en continu par redressement. La puissance continue est ensuite reconvertie en alternatif, à la tension et à la fréquence requises, par un onduleur avant d’être fournie au réseau. Ce processus permet de mieux commander le flux de puissance, la tension, la fréquence et les performances globales.

3.1 Principes fondamentaux du courant alternatif et du courant continu

Le courant électrique est le mouvement de charges dans un conducteur tel qu’un fil ; c’est l’une des notions les plus importantes de l’électricité et de l’électronique. Deux types fondamentaux sont utilisés en pratique : le courant continu (CC) et le courant alternatif (CA). Tous deux décrivent le déplacement des charges, mais leur comportement et leurs usages diffèrent fortement.

En courant continu, les électrons se déplacent continuellement dans un seul sens, du côté négatif vers le côté positif du circuit. Ce sens ne change pas avec le temps. Une batterie est l’exemple le plus courant de source continue, car elle fournit une tension stable et constante. L’énergie qu’elle fournit est idéale pour les composants électroniques qui exigent une tension stable. Même si la prise murale fournit du courant alternatif, les chargeurs le convertissent en continu avant l’utilisation par la plupart des appareils électroniques. Le courant alternatif se comporte différemment : au

lieu de circuler dans un sens constant, il inverse périodiquement sa direction, comme le montre la figure 5.3. Les électrons effectuent donc de nombreux allers-retours chaque seconde. La tension varie elle aussi avec le temps, généralement selon une courbe régulière appelée sinusoïde. Cette alternance rend le CA très efficace pour le transport de l’électricité sur de longues distances. Les centrales produisent du CA, qui alimente les logements et les industries parce que des transformateurs permettent facilement d’en élever ou d’en abaisser la tension et donc

de réduire les pertes de transport. Les pertes dans les lignes expliquent en effet la large utilisation du CA dans la distribution. Lors d'un transport sur une longue distance, une partie de l'énergie se dissipe sous forme de chaleur à cause de la résistance des conducteurs. L'augmentation de la tension et la diminution du courant réduisent fortement ces pertes. Le CA rend cette opération pratique, car les transformateurs modifient efficacement les niveaux de tension. C'est pourquoi l'électricité est produite, transportée puis abaissée en tension avant d'atteindre les habitations.

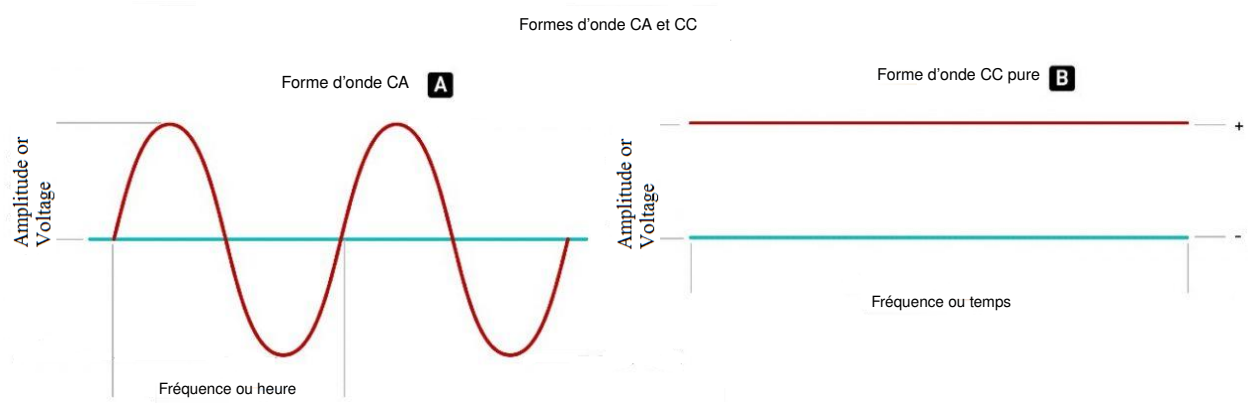


Figure 5.3: Comparaison des formes d'onde CA et CC.

En comparaison, le courant continu assure un flux stable et unidirectionnel, idéal pour les appareils électroniques, les batteries et les circuits numériques qui exigent de la constance. Le courant alternatif change périodiquement de direction, ce qui le rend bien plus efficace pour le transport sur de longues distances et l'alimentation des bâtiments et des industries. Le CC est plus simple et plus facile à stocker, tandis que le CA est plus facile à transformer d'un niveau de tension à l'autre. Les deux sont essentiels et complémentaires dans les systèmes modernes.

3.2 Conversion CA-CC dans un système éolien

Le redressement convertit le courant alternatif en courant continu. Dans les systèmes éoliens modernes, il constitue une étape importante de la chaîne de conversion. La tension et la fréquence de la sortie des génératrices variant généralement avec la vitesse du vent, un raccordement direct au réseau est souvent impossible. La puissance alternative est donc d'abord convertie en puissance continue par un redresseur, avant les traitements ultérieurs et l'intégration au réseau.

Un redresseur est un circuit composé de semi-conducteurs tels que des diodes ou des interrupteurs commandables. Il fait circuler le courant dans un sens contrôlé afin de transformer la forme d'onde alternative en une sortie continue unidirectionnelle. Dans une éolienne, le redressement fournit un étage continu intermédiaire stable qui permet une meilleure commande de la tension, de la fréquence et de la puissance.

Le redresseur à diodes est le plus simple et le plus courant. Les diodes conduisent dans un seul sens et réalisent automatiquement le redressement sans signal de commande externe. Ces redresseurs sont largement utilisés en raison de leur simplicité, de leur faible coût et de leur grande fiabilité, mais leur commandabilité est limitée et le flux de puissance n'est qu'unidirectionnel. Selon la conversion de la forme d'onde, on distingue le redressement simple alternance et le redressement double alternance. Dans le premier, une seule alternance est convertie en continu, l'autre étant bloquée ; l'opération emploie habituellement une diode par phase dans un système triphasé. Dans le second, les alternances positive et négative sont toutes deux converties.

Le pont redresseur est le redresseur double alternance le plus courant. Dans un système triphasé, il comporte généralement six diodes en pont, comme le montre la figure 5.4. Pendant le redressement, une seule diode du rail positif (D1, D3 ou D5) et une seule diode du rail négatif (D2, D4 ou D6) conduisent.

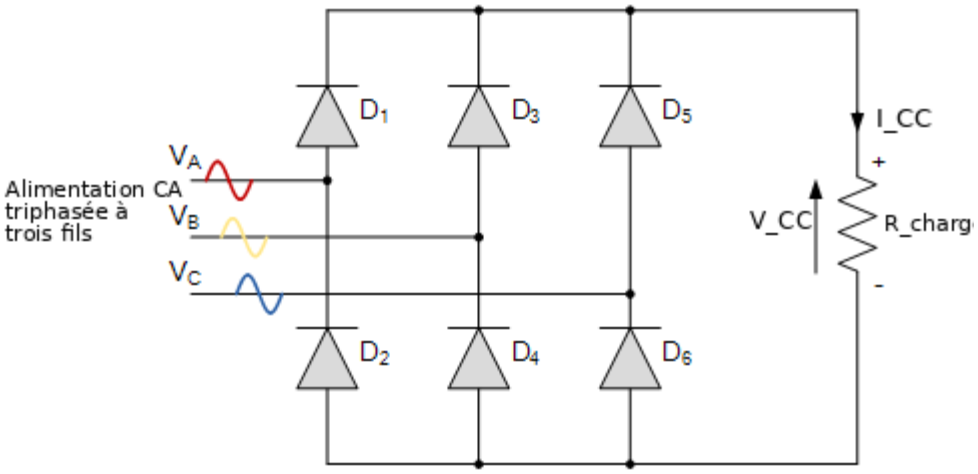


Figure 5.4: Pont redresseur triphasé.

Deux diodes conduisent simultanément pendant chaque intervalle : l'une relie la phase la plus positive à la borne continue positive, l'autre la phase la plus négative à la borne continue négative. Comme les trois tensions de phase varient continuellement, la conduction passe automatiquement d'une paire à l'autre tous les 60°. Pour les tensions triphasées équilibrées de la figure 5.5, si la séquence commence à 30°, les diodes correspondant aux phases la plus positive et la plus négative conduisent à chaque intervalle. La séquence est alors D1-4, D1-6, D3-6, D3-2, D5-2 puis D5-4, avant de se répéter. Cette opération produit une sortie continue beaucoup plus lisse et de moindre ondulation, largement utilisée dans les convertisseurs d'éoliennes et d'autres applications industrielles de forte puissance.

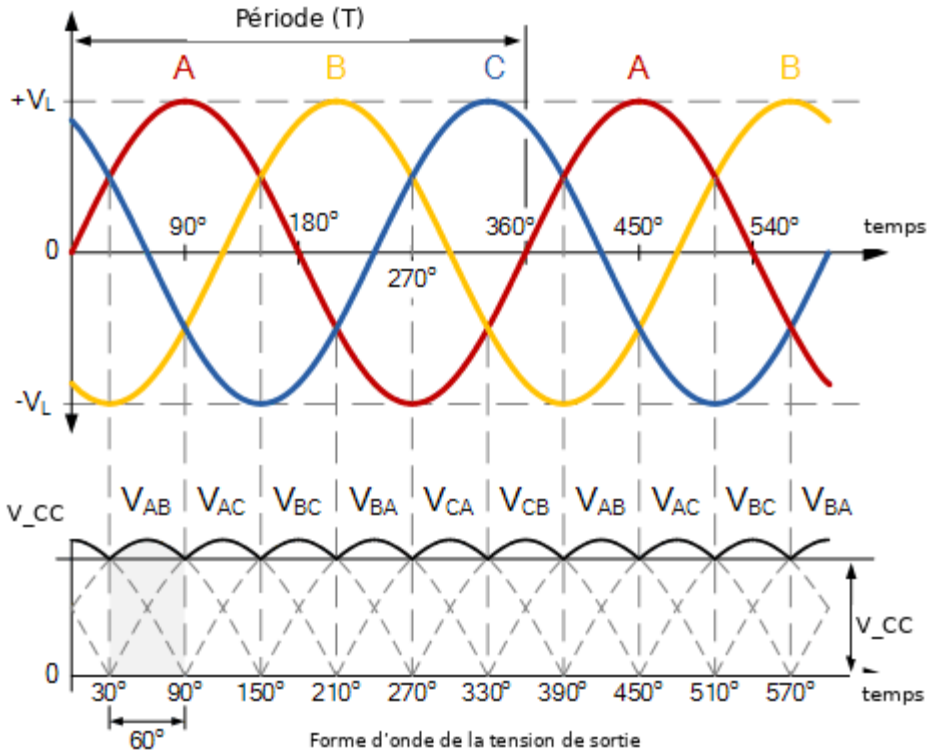


Figure 5.5: Formes d'onde de conduction d'un redresseur triphasé.

3.3 Conversion CC-CA dans un système éolien

Dans les systèmes modernes, la puissance produite est couramment convertie en continu après le redressement. Les réseaux fonctionnent toutefois en alternatif à une fréquence et à des niveaux de tension fixes. La puissance continue doit donc être reconvertie en alternatif avant sa fourniture au réseau. Cette inversion est réalisée par un onduleur, qui permet de produire une puissance alternative commandée dont la tension, la fréquence et la forme d'onde conviennent à une intégration stable au réseau. Il améliore aussi la commandabilité, autorise la vitesse variable, améliore la qualité de l'électricité et rend la conversion plus efficace.

Les éoliennes modernes utilisent couramment des onduleurs de tension triphasés (VSI). Un onduleur triphasé type comporte six composants de commutation, généralement des IGBT, répartis en trois bras. Chaque interrupteur est associé à une diode de roue libre antiparallèle, qui fournit un chemin au courant pendant les transitions de commutation. L'onduleur reçoit la puissance continue du bus et la convertit en une tension alternative triphasée par des commutations commandées. La figure 5.6 décrit un onduleur triphasé.

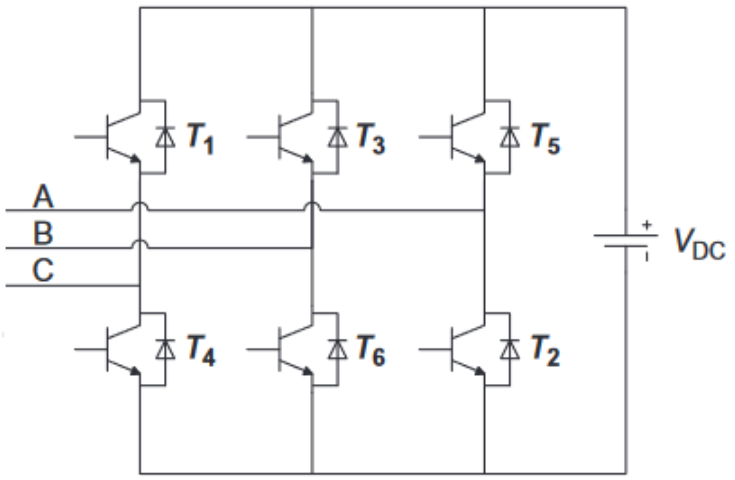


Figure 5.5: Structure d'un onduleur triphasé.

Le schéma de commande élémentaire peut être réalisé en actionnant de façon coordonnée trois paires d'IGBT selon une séquence en six étapes. Chaque interrupteur conduit pendant 180 degrés électriques et la séquence change tous les 60°. Pendant chaque intervalle, trois interrupteurs conduisent simultanément afin de relier les phases de sortie au côté positif ou négatif du bus continu. Par exemple, de 0° à 60°, T1, T5 et T6 conduisent. Deux phases sont reliées à la borne positive (T1 et T5) et une à la borne négative, ce qui produit des niveaux précis de tension de phase sur la charge. Les signaux des deux interrupteurs d'un même bras sont opposés. De 60° à 120°, T1 est bloqué et T4 conduit ; T4, T5 et T6 sont alors actifs et deux phases sont reliées à la borne négative. La séquence produit ainsi des tensions triphasées en gradins décalées de 120°. Ces commutations construisent une forme d'onde alternative à partir de la source continue.

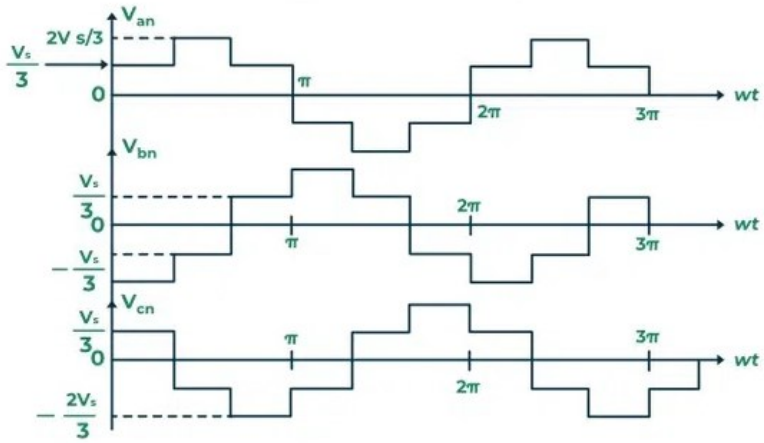


Figure 5.6: Forme d'onde triphasée issue de la séquence de conduction.

La forme d'onde obtenue est initialement en gradins, mais des techniques de commutation à haute fréquence, comme la modulation de largeur d'impulsion (PWM), servent à produire des tensions proches de sinusoïdes et adaptées au raccordement au réseau.

Note technique 3 Dans un mode de conduction d'onduleur triphasé, *deux phases sont à tout instant reliées à un côté du bus continu et la phase restante au côté opposé. Du fait de la charge triphasée équilibrée et du point neutre flottant dans une connexion en étoile, les tensions de phase se répartissent de telle sorte que les deux phases reliées à la même borne continue subissent chacune environ , tandis que la phase restante, reliée à la borne opposée, subit environ avec une polarité inverse. Cet agencement produit la forme d'onde triphasée en gradins utilisée pour synthétiser la tension alternative de sortie.*

4 Systèmes de conversion de l'énergie éolienne

Les éoliennes modernes utilisent différentes configurations électriques pour convertir l'énergie produite sous une forme compatible avec le réseau. Le système global comprend le rotor, le multiplicateur, la génératrice, le transformateur et le convertisseur. La génératrice convertit l'énergie mécanique extraite du vent en énergie électrique ; le convertisseur régule la puissance produite et commande la tension, la fréquence et le flux de puissance avant le raccordement.

Plusieurs types de génératrices sont utilisés : génératrice asynchrone à cage d'écureuil (SCIG), génératrice asynchrone à rotor bobiné (WRIG), génératrice asynchrone à double alimentation (DFIG) et génératrices synchrones telles que la génératrice synchrone à aimants permanents (PMSG). Selon la structure de la génératrice et l'agencement du convertisseur, l'éolienne peut fonctionner à vitesse fixe ou variable. Ces concepts sont couramment répartis entre quatre configurations principales.

4.1 Systèmes éoliens à vitesse fixe

Dans ces systèmes, la vitesse de la génératrice reste presque constante et dépend principalement de la fréquence du réseau, du rapport du multiplicateur et de la conception de la génératrice. Ils ont été largement utilisés dans les premières phases du développement éolien en raison de leur simplicité, de leur robustesse et de leur coût relativement faible. Ils comportent généralement une génératrice asynchrone directement raccordée au réseau. Comme la vitesse ne peut varier fortement avec le vent, les fluctuations se transmettent directement sous forme de variations du couple mécanique et de la puissance électrique. Ces systèmes subissent donc davantage de contraintes mécaniques et offrent une commandabilité limitée.

4.1.1 Type A: vitesse fixe à SCIG

La configuration de type A est le système classique à vitesse fixe fondé sur une génératrice asynchrone à cage d'écureuil. La génératrice est directement raccordée au réseau par un transformateur et un multiplicateur adapte normalement la faible vitesse du rotor à la vitesse plus élevée de la génératrice.

Comme la génératrice asynchrone absorbe de la puissance réactive, des batteries de condensateurs assurent la compensation et améliorent le facteur de puissance. Un démarreur progressif à thyristors est également employé lors du raccordement pour réduire le fort courant d'appel créé à la connexion (figure 5.7). Après la synchronisation, il est contourné.

La configuration de type A est simple et fiable et présente des besoins d'installation et de maintenance relativement faibles. Sa

vitesse presque constante limite toutefois le rendement aérodynamique et l'adaptation aux variations du vent. Elle offre aussi une commande limitée de la tension et de la puissance réactive et exige un réseau relativement fort pour fonctionner de façon stable.

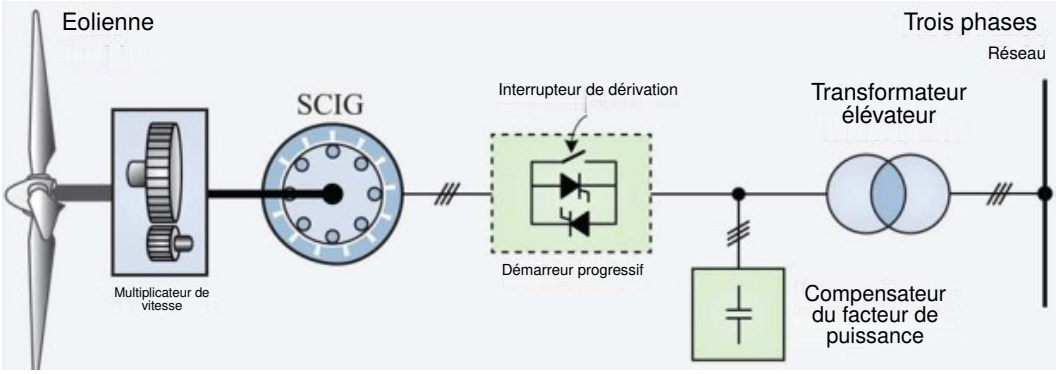


Figure 5.7: Système éolien de type A à vitesse fixe et SCIG.

4.1.2 Type B: vitesse variable limitée

La configuration de type B introduit une vitesse variable limitée au moyen d'une génératrice asynchrone à rotor bobiné et d'une résistance rotorique commandable. La figure 5.8 en donne le schéma.

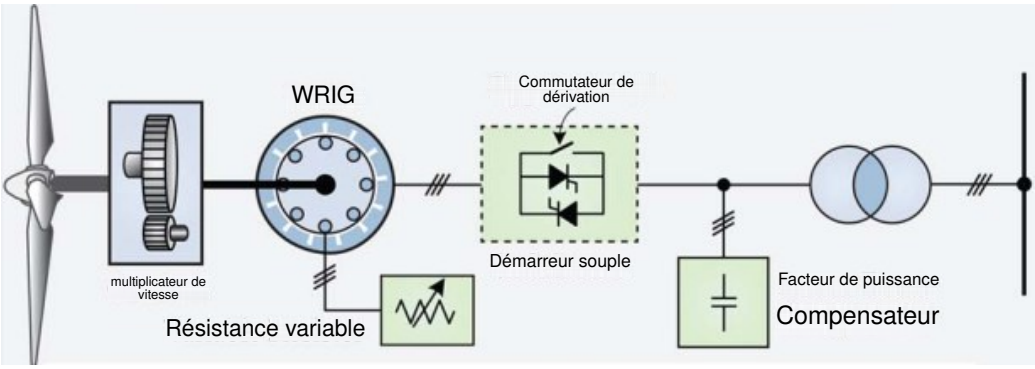


Figure 5.8: Système éolien de type B à WRIG et vitesse semi-variable.

Un contrôleur électronique externe ajuste la résistance rotorique et permet une commande limitée du glissement et de la vitesse. La variation de cette résistance autorise une petite plage de vitesse au-dessus de la vitesse synchrone, améliore la captation d'énergie et réduit les contraintes mécaniques brusques dues aux fluctuations du vent. Cette configuration exige encore un multiplicateur, un démarreur progressif, une batterie de condensateurs et un transformateur pour l'intégration au réseau. Malgré une plage limitée, elle procure un fonctionnement plus régulier et une meilleure commandabilité qu'une éolienne conventionnelle à vitesse fixe. Une partie de l'énergie produite est dissipée dans la résistance rotorique, ce qui réduit le rendement global.

4.2 Systèmes éoliens à vitesse variable

Les éoliennes à vitesse variable fonctionnent sur une vaste plage de vents tout en maintenant un rendement aérodynamique élevé. La vitesse du rotor varie continuellement en fonction de l'énergie disponible, ce qui permet de maintenir un rapport optimal de vitesse en bout de pale et d'extraire davantage d'énergie. Contrairement aux systèmes à vitesse fixe, les variations du vent sont absorbées par les variations de vitesse du rotor plutôt que transmises directement au système électrique. Le fonctionnement à vitesse variable réduit donc les contraintes mécaniques, améliore la qualité de l'électricité et renforce les performances globales. Il exige des convertisseurs pour réguler la puissance produite et maintenir des conditions de raccordement stables. Ceux-ci commandent la tension, la fréquence, la puissance active et la puissance réactive échangées avec le réseau.

4.2.1 Type C : vitesse variable avec convertisseur de fréquence à puissance partielle

La configuration de type C repose sur la DFIG. Le stator est directement raccordé au réseau, tandis que le rotor est relié par des bagues et des balais à un convertisseur de puissance partielle. La figure 5.9 présente ce système.

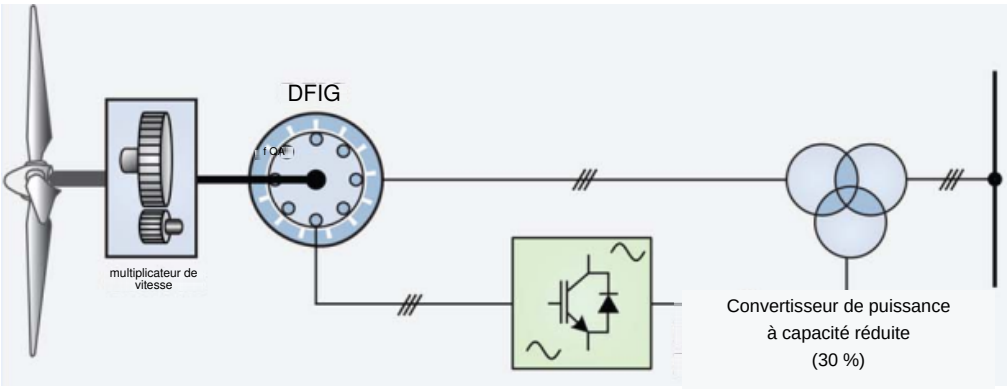


Figure 5.9 : Système éolien de type C à vitesse variable avec DFIG.

Le convertisseur ne traite que la puissance du rotor, généralement environ 25 à 30 % de la puissance totale. Le système peut donc fonctionner à vitesse variable avec un convertisseur de puissance nominale plus faible et moins coûteux qu'un système pleine puissance. La DFIG permet de commander la puissance active et réactive, améliore la captation d'énergie et offre de meilleures performances dynamiques lorsque le vent varie. Le convertisseur permet aussi une commande indépendante du couple de la génératrice et du flux de puissance côté réseau. Comme une partie seulement de la puissance traverse le convertisseur, le rendement global demeure relativement élevé.

L’emploi de bagues collectrices et de balais ajoute toutefois des besoins de maintenance, notamment dans les grandes installations et en mer. Le convertisseur partiel limite aussi les capacités du système lors de perturbations et de défauts sévères du réseau.

4.2.2 Type D: système à vitesse entièrement variable

La configuration de type D représente le système éolien à vitesse entièrement variable. La génératrice est intégralement raccordée au réseau par un convertisseur pleine puissance ; toute la puissance produite traverse donc le convertisseur avant l’intégration. Plusieurs types de génératrices peuvent être employés, notamment PMSG, WRSG et SCIG. De nombreux systèmes utilisent une génératrice à entraînement direct qui supprime le multiplicateur et réduit la complexité mécanique. La figure 5.10 présente cette configuration.

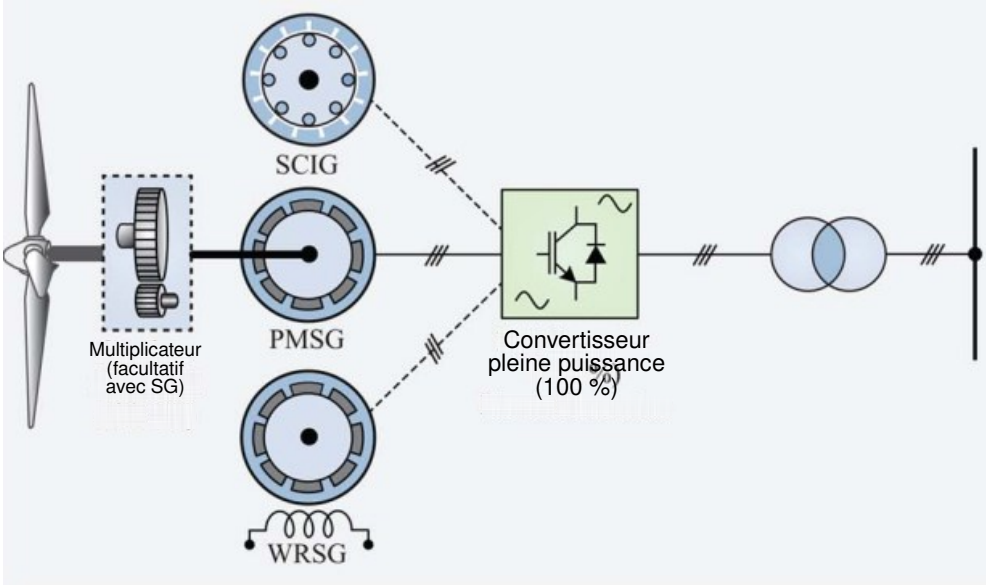


Figure 5.10: Système de type D à convertisseur pleine puissance.

Le convertisseur découple complètement la génératrice du réseau et permet une commande indépendante de la tension, de la fréquence, de la puissance active et de la puissance réactive. Cette configuration offre une excellente compatibilité avec le réseau, une vaste plage de vitesse, une qualité élevée de l’électricité et une meilleure capacité de maintien en service lors d’un défaut. Elle permet aussi une intégration régulière lorsque le vent varie. Comme toute la puissance traverse le convertisseur, celui-ci doit être de plus grande puissance et sa structure est plus complexe, ce qui augmente sa taille, le coût d’installation et les pertes électroniques. Malgré ces difficultés, les systèmes de type D sont largement utilisés dans les grands parcs modernes et en mer en raison de leur commandabilité supérieure et de leur aptitude à soutenir le réseau. Le tableau 5.2 compare les configurations.

Tableau 5.2: Comparaison des différents types de systèmes de conversion de l'énergie éolienne.

Configuration	Type de génératrice	Taille du convertisseur	Avantages	Inconvénients
Type A	SCIG	Aucun convertisseur	Structure simple ; faible coût ; fonctionnement fiable.	Commandabilité limitée ; mauvaise qualité de l'électricité ; fortes contraintes mécaniques.
Type B	WRIG	Contrôleur rotorique	Meilleure captation d'énergie ; fonctionnement plus régulier ; contraintes mécaniques réduites.	Plage de vitesse limitée ; pertes d'énergie au rotor ; rendement réduit.
Type C	DFIG	Puissance partielle, environ 30 %	Bon rendement ; commande de la puissance réactive ; meilleures performances dynamiques.	Maintenance des bagues collectrices ; capacité limitée de maintien en service lors d'un défaut.
Type D	PMSG	Pleine puissance, environ 100 %	Excellente compatibilité avec le réseau ; commandabilité complète ; vaste plage de vitesse.	Coût supérieur ; plus grande taille ; pertes plus élevées du convertisseur.

5 Commande du système de production éolienne

Les éoliennes modernes exigent différentes stratégies de commande pour assurer une conversion efficace, un fonctionnement sûr et une intégration stable au réseau. Le système de commande peut être réparti entre commande aérodynamique et commande électrique. La première régule la puissance mécanique captée au moyen de la régulation par décrochage, du décrochage actif et de la commande de l'angle de pas. Ces méthodes limitent l'excès de puissance mécanique lorsque le vent est fort et protègent les composants contre les surcharges. Les fonctions de commande électrique et réseau comprennent la régulation de la tension et de la fréquence, la commande des puissances active et réactive, l'amélioration de la qualité de l'électricité et la synchronisation. Elles sont principalement réalisées au moyen des convertisseurs et de systèmes de commande numériques.

5.1 Commande de commutation par PWM

Le fonctionnement des convertisseurs repose principalement sur la commutation rapide de composants tels que les IGBT. Dans les redresseurs et onduleurs, ceux-ci passent continuellement de l'état passant à l'état bloqué selon des séquences prédéfinies afin de commander le flux de puissance et de produire la sortie requise. Les sections précédentes ont présenté ces commutations. Dans les onduleurs modernes, des méthodes avancées servent toutefois à améliorer la qualité de la tension alternative produite. La modulation de largeur d'impulsion (PWM) est l'une des techniques les plus répandues. Elle régule la tension moyenne de sortie en commandant la largeur des impulsions de commutation. Au lieu d'une simple onde carrée, elle permet de produire une tension proche d'une sinusoïde. Les semi-conducteurs commutent à haute fréquence, tandis que la largeur des impulsions varie continuellement selon la forme d'onde recherchée. La valeur moyenne des impulsions forme la tension alternative requise.

Parmi les méthodes PWM, la modulation sinusoïdale de largeur d'impulsion (SPWM) est l'une des plus courantes dans les convertisseurs éoliens et les entraînements électriques. Un signal de référence sinusoïdal, appelé onde de modulation, est comparé à un signal triangulaire ou en dents de scie de haute fréquence, appelé porteuse. Cette comparaison détermine les instants de commutation. Lorsque le signal sinusoïdal est supérieur à la porteuse, l'interrupteur correspondant est mis en conduction ; lorsque la porteuse devient supérieure, il est bloqué. Il en résulte une série d'impulsions de largeur variable. La largeur de chacune varie selon la valeur instantanée de la sinusoïde : des impulsions plus larges

produisent une tension moyenne plus élevée, des impulsions plus étroites une tension plus faible. Le procédé produit une forme d'onde

en gradins dont le comportement moyen suit une sinusoïde. Après filtrage, la tension est très proche d'une forme d'onde alternative sinusoïdale adaptée au réseau. La SPWM améliore fortement la qualité de l'électricité en réduisant la distorsion harmonique et en permettant une commande régulière de la tension et de la fréquence. Les techniques PWM permettent aussi une régulation précise des puissances active et réactive, améliorent le rendement du convertisseur et contribuent à la stabilité des éoliennes à vitesse variable. La figure 5.11 présente la porteuse, l'onde de modulation, la production des impulsions et la sortie souhaitée.

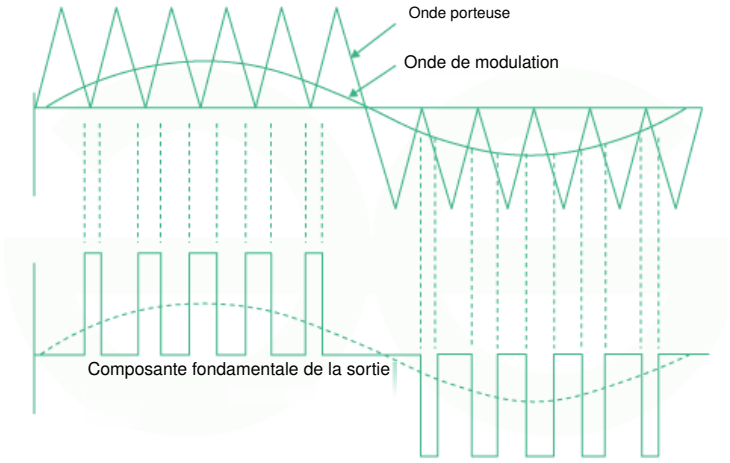


Figure 5.11: Modulation sinusoïdale de largeur d'impulsion.

5.2 Notions de tension et de fréquence

Les systèmes modernes exigent des stratégies avancées pour assurer une extraction efficace de l'énergie et un fonctionnement stable lorsque le vent et le réseau varient. Dans une éolienne à vitesse variable, le convertisseur commande la vitesse de la génératrice en fonction du vent afin de maximiser la puissance captée. Cette opération utilise couramment la recherche du point de puissance maximale (MPPT), dont l'objectif est de maintenir le rapport optimal de vitesse en bout de pale à différentes vitesses du vent afin que l'éolienne fonctionne à son coefficient de puissance maximal.

Outre l'extraction de puissance, les convertisseurs régulent la sortie fournie au réseau. Le convertisseur côté génératrice commande la génératrice et maintient une tension stable du bus continu, tandis que le convertisseur côté réseau fonctionne en onduleur et produit une tension alternative commandée, synchronisée sur la

fréquence du réseau. Des techniques PWM sont couramment utilisées pour produire des tensions sinusoïdales d'amplitude et de fréquence commandables.

Les éoliennes modernes doivent aussi satisfaire aux codes de réseau concernant la puissance active, la puissance réactive, la stabilité de tension et le soutien de fréquence. La commande de puissance active permet à l'éolienne ou au parc d'ajuster la puissance fournie selon les exigences de l'exploitant du système. Dans de nombreux réseaux, la puissance active produite est réduite lorsque la fréquence dépasse sa valeur nominale afin de soutenir la stabilité et de maintenir l'équilibre entre production et demande, comme le montre la figure 5.12.

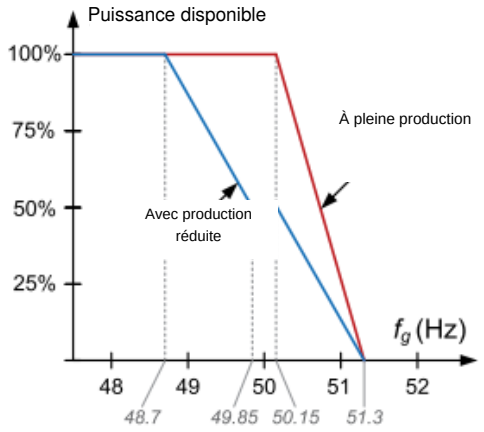


Figure 5.12: Profils de commande de fréquence d'une éolienne type.

La commande de la puissance réactive est étroitement liée à la régulation de la tension. Les éoliennes équipées de convertisseurs peuvent injecter ou absorber de la puissance réactive pour soutenir la tension du réseau. Cette capacité facilite l'intégration des parcs dans des réseaux faibles et réduit les fluctuations de tension provoquées par les variations de production. Les éoliennes à convertisseur peuvent ainsi contribuer au soutien des puissances active et réactive comme des centrales conventionnelles. À mesure que la pénétration de l'éolien augmente, les stratégies de régulation de fréquence, de soutien de tension et d'amélioration de la qualité deviennent de plus en plus importantes. Une commande avancée permet aux éoliennes modernes de fonctionner non seulement comme sources renouvelables, mais aussi comme unités actives et commandables qui contribuent à la stabilité globale du système électrique.

6 Introduction aux notions avancées

Les systèmes éoliens modernes s'appuient de plus en plus sur des technologies avancées d'électronique de puissance pour améliorer leur rendement, leur fiabilité, leur commandabilité et leur aptitude à l'intégration au réseau. Avec l'augmentation de la puissance nominale des éoliennes et la dépendance croissante des systèmes électriques à l'égard des énergies renouvelables, les exigences imposées aux convertisseurs deviennent plus sévères. Les systèmes modernes sont donc conçus non seulement pour convertir l'énergie, mais aussi pour contribuer à la stabilité du système électrique et réduire les pertes.

Les pertes des convertisseurs se produisent principalement dans les composants semi-conducteurs, les composants passifs, les transformateurs et les filtres. Elles comprennent les pertes de conduction et de commutation et apparaissent sous forme de chaleur. Des pertes élevées réduisent le rendement global et augmentent la température du convertisseur. Une contrainte thermique excessive peut raccourcir la durée de vie des semi-conducteurs et réduire la fiabilité. Les convertisseurs sont donc conçus pour atteindre un rendement élevé tout en conservant des conditions thermiques acceptables. Les semi-conducteurs avancés, comme les IGBT et les composants en carbure de silicium (SiC), offrent des pertes de commutation plus faibles, une fréquence de commutation plus élevée et de meilleures performances thermiques que les technologies anciennes.

La fiabilité est devenue l'une des considérations les plus importantes, surtout pour les grandes installations en mer où les réparations sont très coûteuses. Les éoliennes sont censées fonctionner en continu pendant environ 20 ans sous des conditions environnementales et des charges variables. Les fluctuations du vent et les commutations des convertisseurs produisent toutefois des cycles thermiques répétés dans les composants. Ces contraintes constituent l'une des principales causes de défaillance des semi-conducteurs. De plus grandes variations de température réduisent généralement la durée de vie et augmentent la probabilité de défaillance. La conception moderne accorde donc une grande importance à la gestion thermique, au refroidissement et aux stratégies de commande orientées vers la fiabilité.

Les codes de réseau deviennent plus stricts et exigent que les éoliennes se comportent davantage comme des centrales conventionnelles à mesure que la pénétration des renouvelables augmente. Les futurs systèmes devraient donc intégrer une commande plus intelligente des convertisseurs, des communications plus rapides et des fonctions renforcées de soutien au réseau. La réduction du coût global de l'énergie demeure parallèlement un objectif important. Les progrès des semi-conducteurs, du rendement, de la fiabilité et de la durée de vie contribuent tous à diminuer le coût total de la production d'énergie.

Résumé de la séance

Cette séance a présenté le rôle fondamental de l'électronique de puissance dans les systèmes modernes de conversion de l'énergie éolienne et a expliqué comment la puissance produite est commandée, convertie et intégrée au réseau. Elle a d'abord examiné les notions de base, notamment le fonctionnement des semi-conducteurs, redresseurs, onduleurs, convertisseurs, composants de commutation et composants du bus continu. Les apprenants ont étudié comment ces systèmes permettent la conversion entre CA et CC, régulent la tension et la fréquence et améliorent la commandabilité et le rendement. La séance a aussi décrit le redressement et l'inversion, notamment la commutation d'un onduleur triphasé, la production de tension par PWM et le rôle des diodes de roue libre dans le maintien du courant pendant les intervalles de commutation.

La séance a ensuite expliqué l'évolution des configurations, depuis les systèmes à vitesse fixe jusqu'aux systèmes modernes à vitesse variable. Différentes configurations de conversion ont été présentées avec leurs principes, interfaces de génératrice, capacités, avantages et limites. Les apprenants ont aussi étudié l'importance de la commande, notamment la commande des commutations, la modulation sinusoïdale de largeur d'impulsion, la régulation des puissances active et réactive, le soutien de la tension et de la fréquence et la recherche du point de puissance maximale. La séance a enfin présenté les fonctions modernes de soutien au réseau et les tendances futures : semi-conducteurs avancés, convertisseurs à rendement supérieur, codes de réseau plus stricts, fiabilité accrue et importance croissante de la commande intelligente par convertisseur dans les grands systèmes renouvelables. À la fin de la séance, les apprenants doivent comprendre comment l'électronique de puissance permet une conversion efficace de l'énergie éolienne, facilite l'intégration au réseau, améliore les performances et la fiabilité des éoliennes et contribue au développement futur des systèmes éoliens modernes.