

ETUDE D'UNE ÉOLIENNE TRIPALE

Le présent projet constitue le support pédagogique de la deuxième partie du module « **Modélisation et simulation multiphysique** » dans l'environnement du logiciel ANSYS. Le thème choisi par l'équipe pédagogique responsable est en relation avec les énergies renouvelables.

Le vent est une des principales sources d'énergie renouvelable. En effet, l'énergie éolienne permet d'obtenir de l'énergie grâce à la vitesse du vent qui fait entrainer en mouvement de rotation les pâles des éoliennes. Le but de ce projet est d'étudier une éolienne du point de vue aérodynamique, mécanique et électrique.

I. Préliminaire du projet

L'énergie éolienne fait partie des différentes énergies renouvelables et est largement sollicitée du point de vue environnemental. Elle permet d'obtenir de l'énergie grâce à la force du vent, avec la rotation des pâles des éoliennes.

Une éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, dite énergie éolienne. Cette énergie est souvent transformée en électricité (Figure 1).

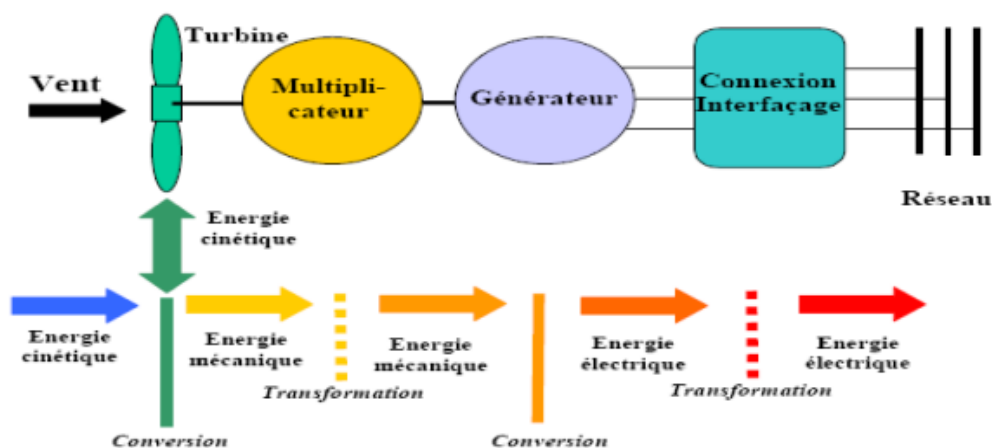


Figure 1. Différents processus de conversion

L'éolienne se compose des éléments suivants comme le montre la figure 2 :

- **Fondation** : qui supporte la superstructure (mât-nacelle-rotor) et qui permet l'ancrage et assure la stabilité de la structure.
- Le **rotor**, partie rotative de l'éolienne placée en hauteur afin de capter des vents forts et réguliers. Il est composé de pâles (en général 3) qui sont mises en mouvement par l'énergie cinétique du vent. Reliées par un moyeu, ces dernières peuvent en moyenne mesurer chacune 25 à 60 m de long et tourner à une vitesse de 5 à 25 tours par minute.
- La **nacelle**, structure soutenue par le mât abritant les différents éléments mécaniques. On distingue les éoliennes à entraînement direct de celles équipées de train d'engrenages (multiplicateur/réducteur) selon le type d'alternateur utilisé. Les alternateurs classiques requièrent une adaptation de la vitesse de rotation par rapport au mouvement initial du rotor.
- La **tour**, composée du mât, du système de commande électrique et du transformateur. Généralement de forme conique, le mât supporte la nacelle. Il mesure entre 50 et 130 m de haut et a un diamètre à son pied compris entre 4 et 7 m. Une ouverture en bas du mât permet d'accéder aux différents équipements de l'éolienne parmi lesquels le transformateur qui permet d'augmenter la tension de l'électricité produite afin de l'injecter sur le réseau.
- La **base**, souvent circulaire et en béton armé dans le cas des éoliennes terrestres, permet de maintenir la structure globale.

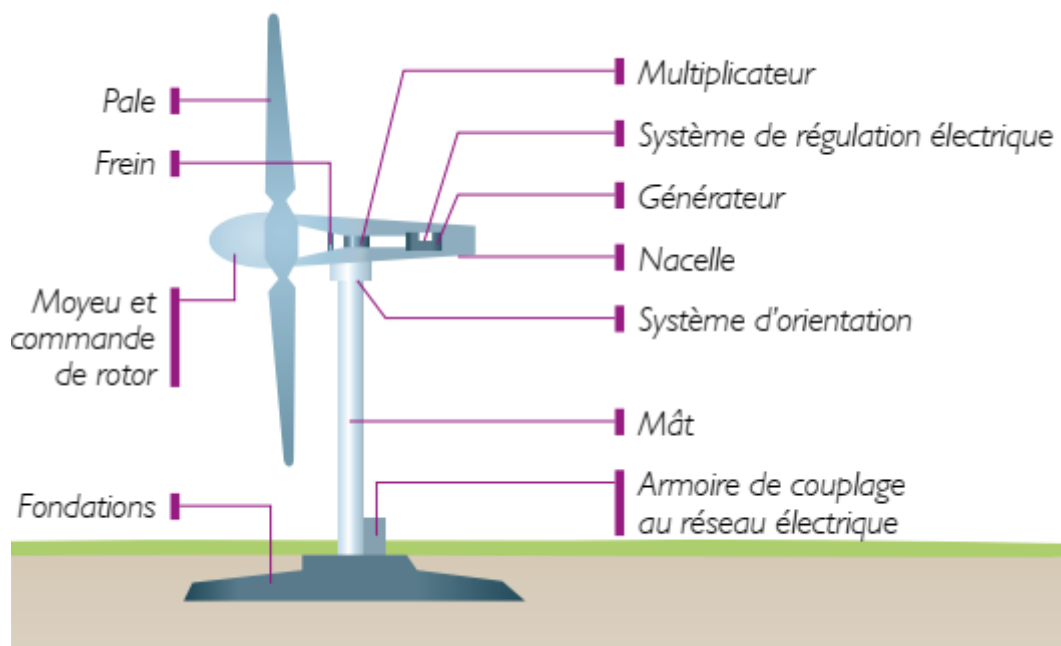


Figure 2. Eolienne horizontale

Description aérodynamique d'une pale d'éolienne :

1. Géométrie d'une pale d'éolienne:

a. Profil de la pale

La pale constitue un élément central dans une éolienne, l'étude de la pale amène à l'étude des profils qui correspondent à une section transversale de la pale. Quelques définitions et illustrations relatives au profil sont indiquées sur la figure 3. En effet le profil est constitué d'un bord d'attaque et d'un bord de fuite. Ces deux bords sont reliés grâce à la corde. Celle-ci varie le long de la pale. L'angle entre la corde et la vitesse du vent V est appelé l'angle d'attaque. L'extrados est la partie du profil orientée vers le haut. L'intrados est celle orientée vers le bas.

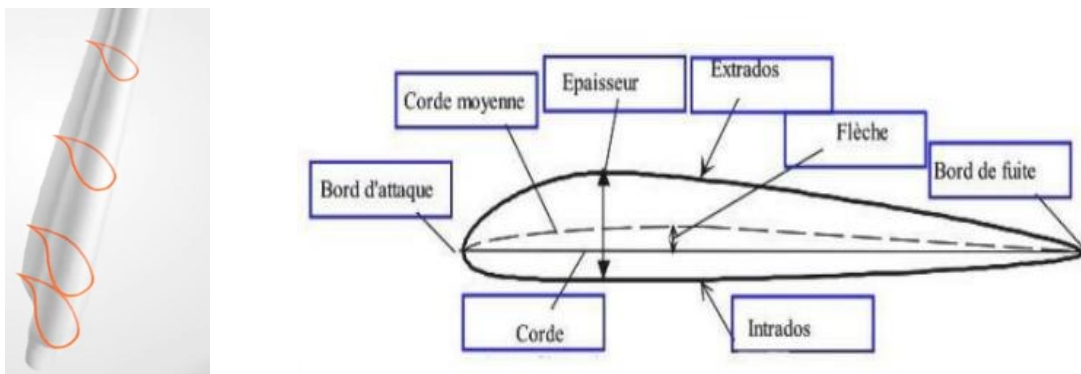


Figure 3. Profil d'une pale d'éolienne

b. Force aérodynamique agissant sur la pale

La vitesse relative caractérisée par une certaine intensité et une direction décrite par l'angle d'attaque induit une force sur le profil (voir figure 4). Cette force se décompose en une composante tangentielle, qui contribue positivement à la rotation de l'éolienne, c'est l'effet utile recherché (du moins pour toute éolienne basée sur la portance), et une composante axiale perpendiculaire au plan de rotation qui n'a aucun effet utile. Au contraire, cette force axiale soumet l'éolienne par sa poussée à une contrainte mécanique importante. C'est l'élément dominant lors du dimensionnement du mât d'une éolienne.

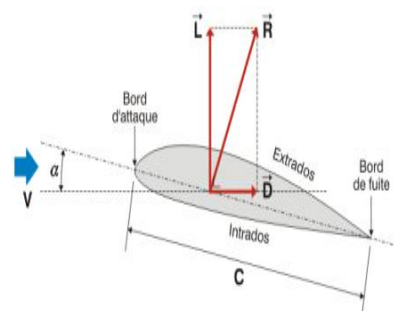


Figure 4. Composantes de la force aérodynamique

Si on décompose la force aérodynamique selon sa composante de portance et de trainée, on en déduit les propriétés suivantes :

➤ Portance :

La force de portance est une force perpendiculaire à la direction du déplacement du fluide. Elle est créée par une surpression au niveau de l'intrados et par l'aspiration dans la zone de dépression formée sur le dessus du profil destinée à cet effet, son expression est donnée par :

$$L = q \cdot S \cdot C_l = \frac{1}{2} \cdot \rho_{air} \cdot v_r^2 \cdot S \cdot C_l$$

L: portance (en N).

ρ_{air} : masse volumique de l'air (1,225 kg/m³ à 15°C au niveau de la mer).

v_r : vitesse de déplacement : vitesse relative du vent par rapport à la pôle (en m/s).

S : surface de la pôle (surface projetée, surface mouillée, maître couple) (en m²).

C_l : coefficient de portance, il est déterminé en soufflerie et est propre pour chaque profil de pôle.

➤ Trainées :

Elle correspond à la résistance de l'air, celle-ci augmente avec la surface exposée à la direction de l'écoulement de l'air. La traînée est une force qui agit sur la pôle dans la même direction que le vent. Cette force tend à contrer le mouvement d'avancement de la pôle et doit donc être la plus faible possible. La traînée est calculée de la façon suivante :

$$D = q \cdot S \cdot C_D = \frac{1}{2} \cdot \rho_{air} \cdot v_r^2 \cdot S \cdot C_D$$

D : traînée en (N).

ρ_{air} : masse volumique de l'air (1,225 kg/m³ à 15°C au niveau de la mer).

v_r : vitesse de déplacement : vitesse relative du vent par rapport à la pôle (en m/s).

S : surface de la pôle (surface projetée, surface mouillée, maître couple) (en m²).

C_D : coefficient de traînée

C_l et C_D sont des coefficients adimensionnels, qui sont propres à la forme d'un profil aérodynamique mais indépendants de son échelle. Pour une géométrie de profil donnée et pour un nombre de Reynolds donné, ces coefficients varient donc en fonction de l'angle d'attaque α . Une caractéristique essentielle d'un profil est sa finesse c'est-à-dire le rapport entre la portance et la traînée qu'il génère. La finesse d'un profil dépend principalement de trois facteurs :

- Sa géométrie.
- L'angle d'attaque auquel il est utilisé.
- Le régime d'écoulement.

L'action aérodynamique totale ou résistance de l'air est la résultante de ces deux forces de trainée et de portance.

2. Puissance d'une éolienne

Une éolienne a pour rôle de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Ses différents éléments sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique et, d'une manière générale, une bonne adéquation entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et la génératrice électrique est indispensable.

Les éoliennes ne produisent pas une quantité constante d'énergie. La masse d'air, la force et la vitesse du vent ont un réel impact sur la quantité d'énergie produite par une éolienne. Le rendement de cette machine est aussi un facteur à prendre en compte. Il s'agit de sa capacité à convertir la vitesse de rotation des hélices en électricité sans perdre une grande quantité d'énergie au cours de la transformation.

La puissance cinétique

La puissance cinétique du vent est donnée par :

$$P_v = \frac{\rho_{air} \cdot S \cdot v^3}{2}$$

V: vitesse du vent (en m/s).

S : surface circulaire balayée par la turbine ; $S=\pi R^2$.

La mise en rotation des pâles par le vent crée une puissance mécanique P_t sur l'arbre de la turbine exprimée par :

$$P_t = \frac{1}{2} C_p \cdot \rho \cdot S \cdot V^3$$

- C_p : est le coefficient qui caractérise le rendement aérodynamique de la turbine (coefficient de puissance). Il dépend des caractéristiques de la turbine (les dimensions de la pôle, le ratio de la vitesse λ et l'angle d'orientation de la pôle β). Ce coefficient permet de distinguer différents types d'éoliennes (Fig.5)

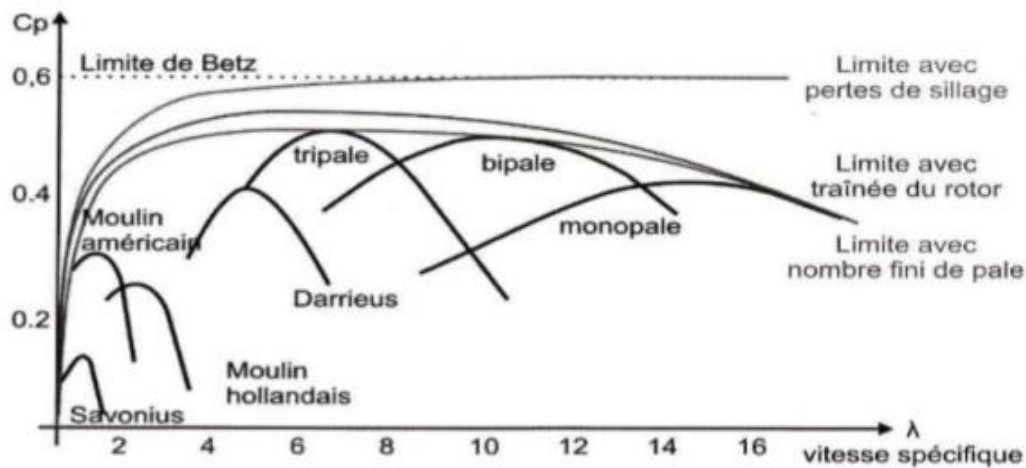


Figure 5. Représentations des performances des différents types d'éoliennes

La valeur maximale théorique possible du coefficient de puissance, appelée limite de Betz est de $16/27$. Dans la pratique, C_p appartient obligatoirement à $[0, 16/27]$

- Le coefficient de puissance indique l'efficacité avec laquelle l'éolienne convertit l'énergie du vent en électricité.
- Le ratio de vitesse est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire de la turbine Ω_t et la vitesse du vent, son expression est donnée comme suit :

$$\lambda = \frac{\Omega_t \cdot R}{v}$$

- La vitesse spécifique ou le paramètre de rapidité noté λ (Lambda) en anglais Tip Speed Ratio (TSR) est le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pâles et la vitesse du vent. Les machines peuvent être classées en fonction de ce paramètre : si λ est inférieur à 3, l'éolienne est dite lente.

Remarque : L'énergie produite par une éolienne en heures est dite « puissance nominale » est l'énergie que peut produire l'éolienne lorsqu'elle tourne à plein régime dans des conditions optimales de fonctionnement.

Courbe de puissance

La courbe de puissance représente la variation de la puissance d'une éolienne en fonction de la vitesse du vent. Chaque éolienne a sa propre courbe de puissance. Cependant, toutes les courbes ont la même allure (figure 6).

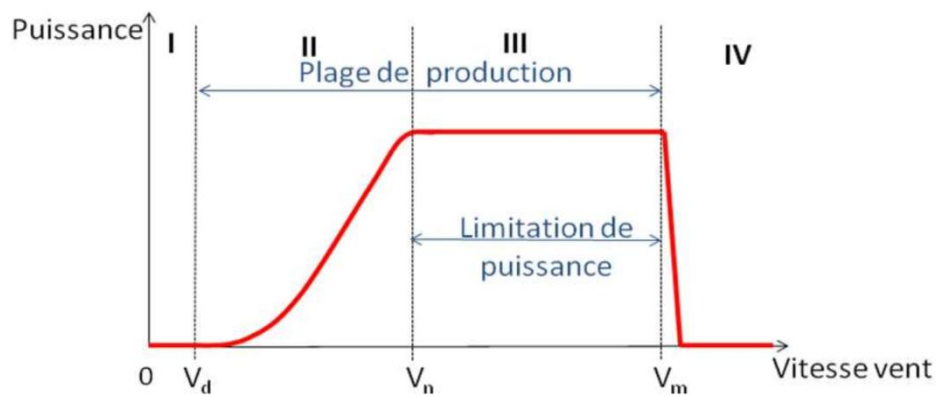


Figure 6. Courbe de puissance théorique

- Partie I (de 0 à V_d): Le vent a une vitesse trop faible. Les pâles de l'éolienne peuvent tourner mais la puissance à capter est trop faible. V_d , la vitesse de démarrage est de l'ordre de 3m/s.
- Partie II (de V_d à V_n) : Les pâles accélèrent progressivement et par conséquent la puissance augmente. Elle atteint son maximum vers 15 m/s qui est sa vitesse nominale V_n . Cette partie correspond au fonctionnement à charge partielle.
- Partie III (de V_n à V_m) : La puissance reste constante dans le but de protéger l'éolienne. En effet, la vitesse de rotation des pâles est volontairement limitée par ce qu'on appelle le système pitch. Cet effet consiste à tourner les pâles de quelques degrés afin de limiter la force qui entraîne les pâles de l'éolienne. Cette partie correspond au fonctionnement à pleine charge.
- Partie IV ($> V_m$) : la puissance devient nulle suite à l'arrêt de l'éolienne. La vitesse maximale V_m est de l'ordre de 25 m/s. Une vitesse du vent supérieure à V_m peut détériorer l'éolienne.

Pour réussir la conception d'une éolienne, plusieurs domaines (mécanique, interaction sol-structure, aérodynamique...) doivent être pris en compte. Généralement, ces structures sont conçues dans des conditions météorologiques et géotechniques extrêmes. Ainsi, pour un modèle plus réaliste, l'interaction sol-structure (SSI) doit être prise en compte lors de la conception de l'éolienne. En effet, la fondation de ces structures élancées doit résister aux forces vibratoires continues du rotor et aux charges aérodynamiques et hydrodynamiques complexes dues aux vents et aux vagues.

II. Contexte du projet et cahier des charges

L'objectif global de ce projet porte sur l'étude et la conception d'une éolienne capable de générer une puissance donnée. Les objectifs spécifiques fixés pour ce projet sont résumés comme suit :

1. Etude numérique de la variation de la portance et de la traînée en fonction de :
 - La forme du profil
 - L'angle d'incidence
 - La vitesse relative (vent/pâle)pour maximiser la finesse du profil.
2. Conception du mât de l'éolienne (Forme, dimensionnement, choix de matériaux...)
3. Conception de l'éolienne (pâles et mât)
4. Vérification des conditions de fonctionnement de l'éolienne étudiée.
5. Conception et dimensionnement de la chaîne de transmission : multiplicateur, arbre de transmission
6. Gestion de stockage de l'énergie et connexion au réseau

Travail demandé et organisation :

Organisation et étapes de la réalisation du projet :

Le présent travail de projet consiste à faire l'étude d'une éolienne tripale en utilisant les outils de simulations numérique Ansys.

Organisation : binôme

Pour mener à bien le travail de ce projet de bureau d'étude, on propose « **à titre indicatif** » les étapes suivantes planifiées sur les cinq séances allouées à ces travaux **en présentiel**. Ces étapes peuvent subir des compléments et/ou des modifications au cours de l'avancement de la réalisation du projet.

Etape 1 (séance 1 : 4 heures) :

- Lecture et analyse du texte du projet, compréhension des objectifs, planification, ...
- Simulation numérique sous Ansys (fluent, ...) de l'écoulement de l'air autour d'un profil de forme circulaire de diamètre $D = 1 \text{ m}$: l'idée de base consiste à considérer la

pale est un tube de diamètre extérieur D , on pourra choisir son épaisseur $e = 5 \text{ mm}$. On déterminera ensuite pour ce modèle initial les coefficients de trainée et de portance, contours de pression et champs de vitesses, le schéma de la figure 7 permet de donner une estimation de l'emplacement des parois par rapport au profil. *On pourra faire référence aux études théoriques pour comparer vos résultats de simulation aérodynamique. Notez bien que cette comparaison a une grande importance dans la validation des résultats de la simulation.*

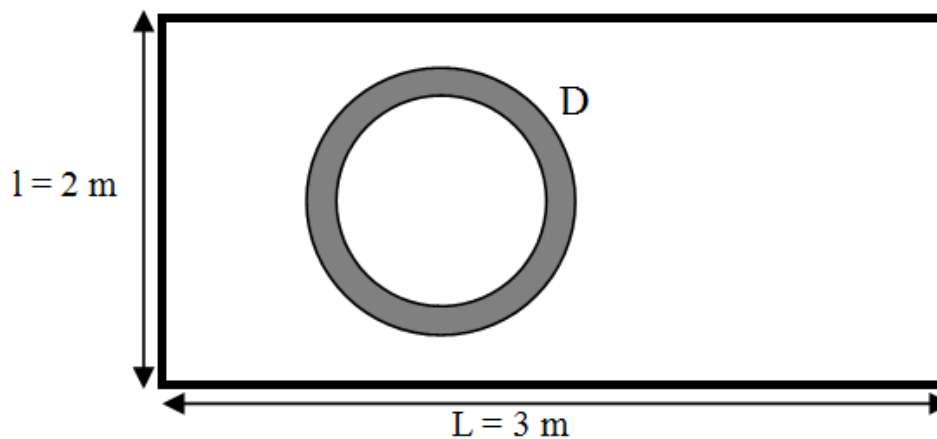


Fig.7. Modèle initial de référence

- Simulation numérique sous Ansys (fluent, ...) de l'écoulement de l'air autour d'un profil standard ; à titre d'exemple : NACA 63-412, TsAGI R-3a, profil S809...et détermination de la finesse du profil...
- Effet du maillage (choix de maillage : élément quadrilatéral et élément triangulaire) ; modèle de l'écoulement...
- Analyse de l'effet de la vitesse du vent et les paramètres de fonctionnement (angle d'attaque du vent, ...) sur la pale : (Angle de décrochage, force aérodynamique, champ de vitesse, contour de pression...).
- Conclusion

Etape 2 (séance 2 : 4 heures) :

- Lancer la simulation en 2D et 3D : une seule pale puis éolienne tripale
Proposition d'un modèle CAO d'une éolienne, Il est recommandé de le réaliser sous CATIA par exemple, en prenant une échelle réduite des dimensions de l'éolienne.
- Refaire le même travail en faisant varier la vitesse du vent : (Force aérodynamique, champ de vitesse, contour de pression...)

- Refaire le même travail en variant l'angle d'attaque du vent.
- Conclusion

Etape 3 (séance 3 : 4 heures) : Etude de la structure (pâle)

- Modélisation de la structure
- Analyse des contraintes et des déformations subies par les pâles en variant la vitesse du vent, l'angle d'attaque...
- Analyse vibratoire : modes propres,

Etape 4 (séance 4 : 4 heures) : Etude de la structure (éolienne tripale et mât)

- Conception et pré-dimensionnement du mât (Forme, dimension, choix de matériaux...)
- Vérification de la résistance aux charges appliquées par simulation numérique sous Ansys

Etape 5 (séance 5 : 4 heures) :

- Conception et dimensionnement de la chaîne de transmission : multiplicateur, arbre de transmission.
- Dessin de conception de la chaîne de transmission
- Choix de la génératrice
- Gestion de stockage de l'énergie électrique et connexion au réseau
- Dessin de conception de l'éolienne : version finalisée

Annexe 1

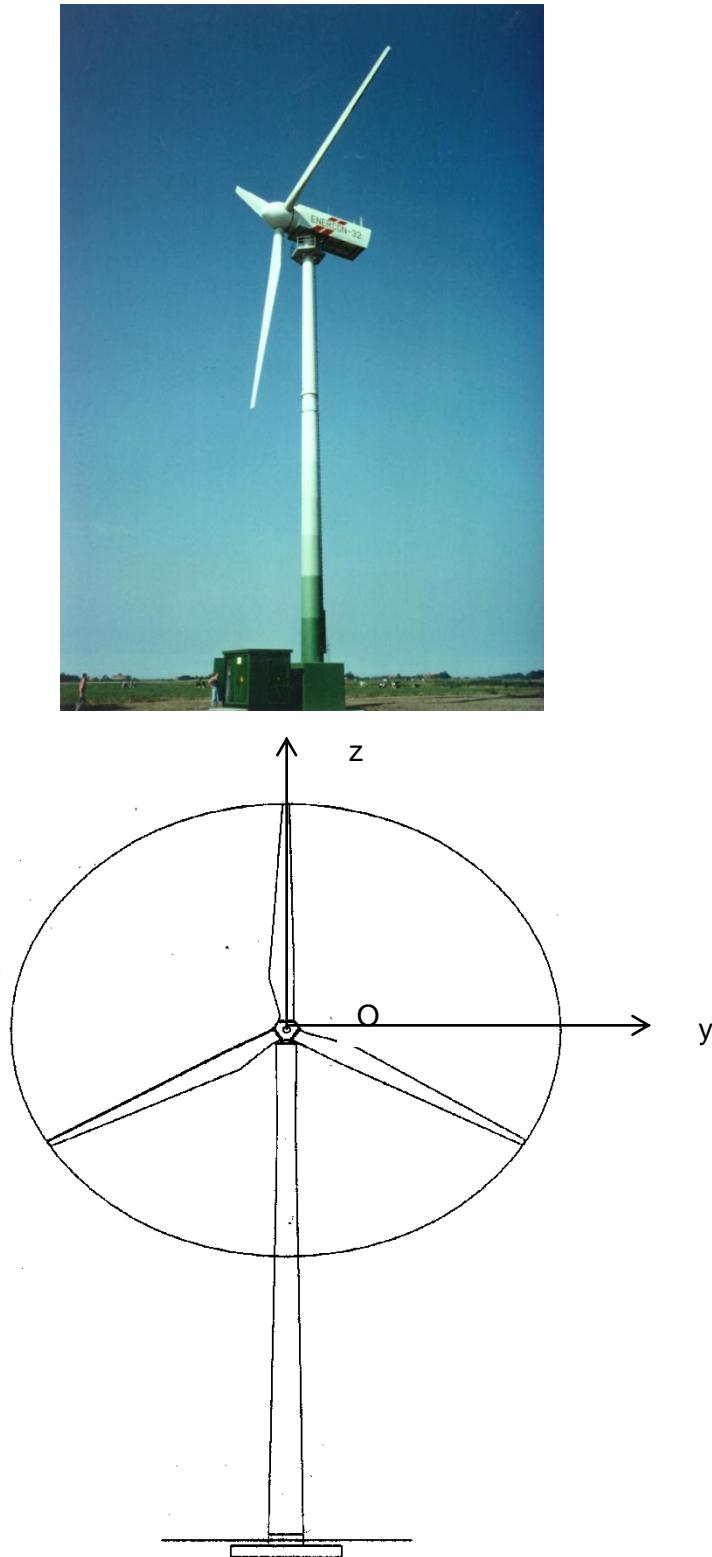


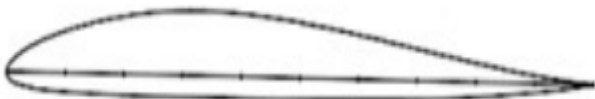

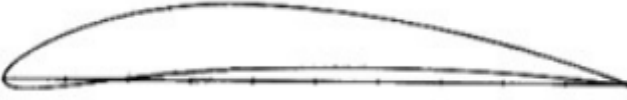
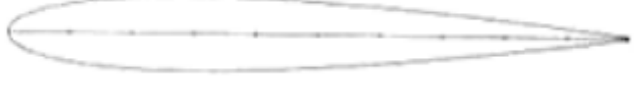
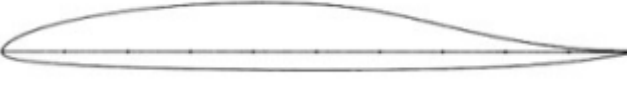
Figure A-1 – Eolienne en élévation (Photo SIME Industrie)

Annexe 2 :

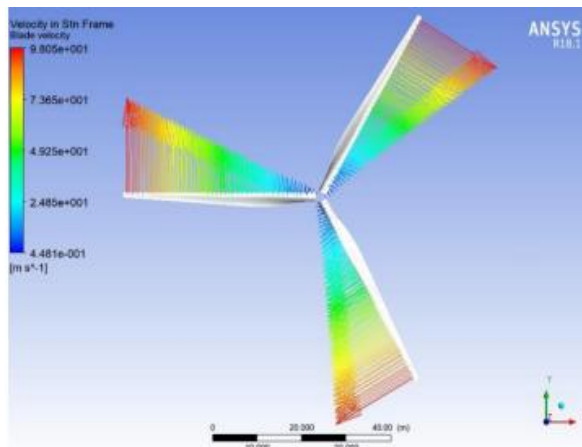
Caractéristiques de l'éolienne Vestas V80 1.8 MW

		Valeur	Unité
Rotor	Diamètre	80	m
		264	ft
	Surface balayée	5027	m ²
	Vitesse de rotation nominale (IEC 1A)	16.8	tours/min
	Vitesse de rotation nominale (IEC 2A)	15.5	tours/min
	Régulation de la puissance	Pas (calage) variable	-
	Orientation	Face au vent	-
	Angle de cône	6	deg
	Nombre de pales	3	-
Tour	Hauteur du moyeu	60/67/78	m
		198/221/257	ft
Pale	Corde (base/bout de pale)	3.52 / 0.48	m
		11.62 / 1.6	ft
	Vrillage (base/bout de pale)	13 / 0	deg
	Angle de pas	Ajustable de 10 à 20	deg
	Profils aérodynamique	NACA 63 XXX et FFA W3 XXX	-
Données opérationnelles	Vitesse de démarrage	4	m/s
	Vitesse de vent nominale	16	m/s
	Vitesse de coupure	25	m/s

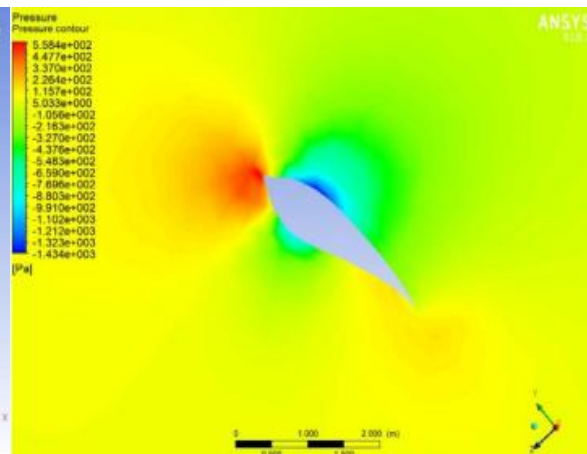
Exemples de profils des pâles d'éolienne

	
Profil plane convexe	Profil biconvexe dissymétrique
	
Profil cambré ou creux	Profil biconvexe symétrique
	
Profil double courbure	

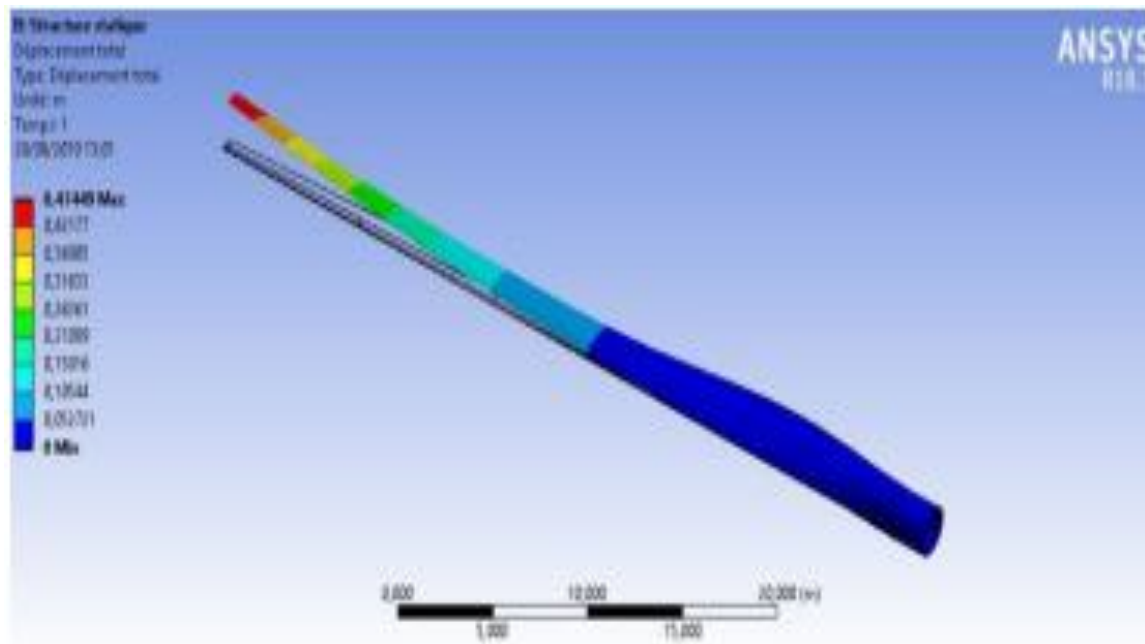
Etude fluent : Contours de pression ; Champs de vitesse ; déformations



Vecteurs vitesses de la pôle



Contours depression



Déformations subies par la pôle