

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la  
Recherche Scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

Projet de fin de cycle

Présenté pour l'obtention du diplôme de

**MASTER ACADEMIQUE**

Domaine: Technologies

Filière: Energies renouvelables

Spécialité: Energies renouvelables en mécanique

Thème

**Simulation d'une Pale éolienne NACA  
4412**

Devant le jury composé de :

- ✓ MANSOURI Khaled      Président
- ✓ GHERBI M Taher      Examineur
- ✓ BOUSBIA Seif Eddine      Encadreur

Présenté par :

**DIFALLAH Brahim**  
**LABIOD Larbi**

Année Académique 2017-2018

# Sommaire

**Remerciement**

**Dédicace**

**Liste des figures**

**Liste des tableaux**

**Nomenclature**

**Introduction générale** .....1

## **Chapitre I : Généralités sur l'énergie éolienne**

I-1- l'énergie éolienne .....2

I-1-1- Définition de l'énergie éolienne.....2

I-1-2- L'énergie Eoliennes en Algérie .....3

I-1-3- Potentiel du vent en Algérie .....3

I-2- Les différents types d'éoliennes: .....4

I-2-1- Les éoliennes à axe horizontal.....4

I-2-1-a- Les avantages.....5

I-2-1-b- Les inconvénient .....5

I-2-2- Les éoliennes à l'axe vertical.....6

I-2-2-a-Les avantages.....6

I-2-2-b- Les inconvénient.....6

I-3- Les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne .....7

I-3-1- Les avantage .....7

I-3-2- Les inconvénients.....8

I-4- Éléments Constitutifs D'un Aérogénérateurs (A Axe Horizontal) .....8

I-5- Les composants d'un pale éolienne.....10

I-6- Les différents des profils d'une pale.....12

## **Chapitre II : Modélisation mathématique**

II-1- Caractéristiques géométrie d'une pale d'éolienne .....14

II-2- Quelque type de profils NACA .....14

II-3- Désignation d'un profil .....15

II-3-1- NACA à quatre chiffres .....15

II-3-2- NACA à cinq chiffres .....15

II-4- Caractéristique aérodynamique d'une pale d'éolienne .....	15
II-4-1- Action de l'air sur pale en mouvement .....	15
II-5- Equation gouvernantes .....	17
II-5-1- Equation de continuité .....	18
II-5-2- Equation de quantité de mouvement suivant x .....	18
II-5-3- Equation de quantité de mouvement suivant y.....	18
II-6- Le modèle de turbulence .....	18
II-6-1- Modèle (k- $\epsilon$ ) .....	18
II-6-1-a- Equation modélisée de K .....	19
II-6-1-b- Equation modélisée de $\epsilon$ .....	20
II-6-2- Modèles des constantes .....	20
II-6-3- Nombre de Mach.....	20
II-6-4- Nombre de Reynolds .....	21
II-6- Le principe de Bernoulli .....	21
II-6-1- Equation de Bernoulli .....	22
II-6-2- Equation simplifiée de Bernoulli .....	22
II-8-Elément finit.....	23
II-8-1- Etablissement de la relation entre déformations et déplacement .....	23
II-8-2- Etablissement de la relation entre contraintes et déformations .....	23
II-8-3- Calcul des matrices élémentaires .....	23
II-8-4 Champ des déplacements .....	23
II-8-5-Déformation .....	24
II-8-6- Discrétisation par éléments finis .....	24
II-8-7-Procédure de résolution .....	25

### **CHAPITRE III : Résultats numérique**

III-1-Introduction .....	26
III-2-Le point de profile étudiée NACA 4412.....	26
III-3-Géométries de profile .....	27
III-4-FLUENT.....	27
III-4-1-Choix des types de frontières.....	28
III-4-2-Les conditions aux limites au pale NACA 4412 .....	28
III-4-3-Choix des schémas de discrétisation .....	28

III-4-4-Sous relaxation.....	29
III-5-Résultats et interprétation.....	29
III-5-1-Analyse dynamique de solide/fluide.....	29
III-5-1-a-L'effet de vitesse sur la pale NACA 4412.....	29
III-5-1-b-L'effet de pression sur la pale NACA 4412.....	30
III-5-2-Analyse modale .....	34
III-5-2-a-Les fréquences naturelles de la pale NACA 4412.....	34
III-5-2-b-Les déformées modales .....	35
III-5-3-Analyse statique.....	39
III-5-3-a-Les contraintes de la pale NACA 4412.....	39
III-5-3-b-Les déformation de la pale NACA 4412.....	40
III-5-3-c-Déplacement de la pale NACA 4412.....	40
III-6-Conclusion .....	42
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>43</b>

## Liste Des Figures

<b>Figure I-1</b> : Conversion de l'énergie cinétique du vent .....	2
<b>Figure I-2</b> : Atlas de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimé à 10 m d'altitude du sol.....	3
<b>Figure I-3</b> : Technologie éolienne à axe horizontale .....	4
<b>Figure I-4</b> : Schéma d'une éolienne de type aérogénérateur .....	5
<b>Figure I-5</b> : Eoliennes à axe vertical.....	7
<b>Figure I-6</b> : Les composantes de l'aérogénérateur.....	9
<b>Figure I-7</b> : Le pale éolienne.....	10
<b>Figure I-8</b> : Pale effilée .....	11
<b>Figure I-9</b> : Pale à section constante .....	11
<b>Figure I-10</b> : profil plane convexe.....	12
<b>Figure I-11</b> : profil biconvexe dissymétrique.....	12
<b>Figure I-12</b> : profil combré au creux.....	13
<b>Figure I-13</b> : profil biconvexe symétrique.....	13
<b>Figure I-14</b> : profil double courbure.....	13
<b>Figure II-1</b> : Profile d'une pale.....	14
<b>Figure II-2</b> : Quelque type de profils NACA.....	14
<b>Figure II-3</b> : Pressions générées par le mouvement du vent autour une section de la pale.....	16
<b>Figure II-4</b> : Les composantes de la force aérodynamique.....	16
<b>Figure II-5</b> : Distribution de la vitesse de l'air.....	22
<b>Figure III-1</b> : Point de profil NACA 4412.....	26
<b>Figure III-2</b> : Dimension de profil 2D NACA 4412.....	27

<b>Figure III-3</b> : Domine de travail simulation 2D pale NACA 4412.....	27
<b>Figure III-4</b> : Contours de la grandeur de vitesse résultante (m/s) .....	29
<b>Figure III-5</b> : Contours de la grandeur de vitesse résultante (m/s) dans le pale NACA 4412...	30
<b>Figure III-6</b> : Contours de pression statique (Pa) .....	30
<b>Figure III-7</b> : Contours de pression totale (Pa) .....	31
<b>Figure III-8</b> : Contours de pression statique (Pa) dans le pale NACA 4412.....	31
<b>Figure III-9</b> : Nombre de Reynolds dans le pale NACA 4412 .....	32
<b>Figure III-10</b> : contours taux de déformation .....	32
<b>Figure III-11</b> : Contour de contrainte de cisaillement de mur.....	33
<b>Figure III-12</b> : Les valeurs Cd et Cl et Cm .....	34
<b>Figure III-13</b> : La fréquence on fonction numéro de mode.....	35
<b>Figure III-14</b> : Mode de 1 <sup>ème</sup> déformée 1 <sup>er</sup> mode de battement .....	35
<b>Figure III-15</b> : Mode de 2 <sup>ème</sup> déformée 2 <sup>ème</sup> mode de battement .....	36
<b>Figure III-16</b> : Mode de 3 <sup>ème</sup> déformée mode de 1 <sup>er</sup> Trainé .....	36
<b>Figure III-17</b> : Mode de 4 <sup>ème</sup> déformée 3 <sup>ème</sup> mode de battement.....	37
<b>Figure III-18</b> : Mode de 5 <sup>ème</sup> déformée 1 <sup>er</sup> mode de torsion .....	37
<b>Figure III-19</b> : Mode de 6 <sup>ème</sup> déformée 4 <sup>ème</sup> mode de battement.....	38
<b>Figure III-20</b> : Les déformation Max de la pale 4412.....	39
<b>Figures III-21</b> : La contrainte Max dans le pale NACA 4412.....	39
<b>Figures III-22</b> : La déformation Max de la pale NACA 4412.....	40
<b>Figures III-23</b> : Déplacement suivant x .....	40
<b>Figures III-24</b> : Déplacement suivant Y.....	41

<b>Figures III-25</b> : Déplacement suivant Z .....	41
<b>Figures III-26</b> : Dé placement totale .....	42

## *Liste Des Tableaux*

<b>Tableau II-1</b> : Coefficients du modèle K- $\epsilon$ standard .....	21
<b>Tableau III-1</b> Point de profile NACA 4412.....	26
<b>Tableau III-2</b> : Types de frontières.....	28
<b>Tableau III-3</b> : Les schémas de discrétisation.....	28
<b>Tableau III-4</b> : Les facteurs de sous relaxation.....	29
<b>Tableau III-5</b> : La valeur de coefficient de portance et traine et moment.....	34
<b>Tableau III-6</b> : Les fréquences naturelles de la pale.....	34
<b>Tableau III-7</b> : Les déformations Max de la pale .....	38
<b>Tableau III-8</b> : Valeur max de contrainte .....	39
<b>Tableau III-9</b> : Valeur max de déformation.....	40
<b>Tableau III-10</b> : Valeur max de déplacement X.....	40
<b>Tableau III-11</b> : Valeur max de déplacement Y.....	41
<b>Tableau III-12</b> : Valeur max de déplacement Z.....	41
<b>Tableau III-13</b> : Valeur max de déplacement total.....	42

## Nomenclature

### Notations latines

$F^*$ : La force aérodynamique

$F_Z$ : La force de portance

$F_X$ : La force de trainée.

$F$ : La poussé axiale.

$C_p$ : Coefficient de puissance

$C_Z$ : Coefficient sans unité appelé coefficient de portance

$C_U$ : Coefficient sans dimension

$C_X$ : Coefficient sans unité appelé coefficient de trainée

$K$ : L'énergie cinétique de turbulence

$S$ : Surface paléage éolienne [ $m^2$ ]

$Ma$ : Nombre de mach

$Re$ : Nombre de Reynolds

$a$ : Vitesse du son [ $m/s$ ]

$R$ : Constante universelle des gaz [ $J/kg/K$ ]

$V$ : Vitesse d'écoulement [ $m/s$ ]

$\gamma$ : Capacités thermique massique

$\rho$ : La masse volumique [ $kg/m^3$ ]

$\nu_t$ : Viscosité cinématique turbulente [ $m^2/s$ ]

$\mu_t$ : Viscosité dynamique [ $kg/(m \cdot s)$ ]

$\epsilon$ : Le taux de dissipation

$\Omega$ : Vitesse de rotation [ $Rad/s$ ]

$L$ : Longueur de pale [ $m$ ]

$\delta$ : Vecteur des déplacements nodaux

$p$ : désignant la pression statique a la paroi au pied de la borne de mesure

$W$ : Vitesse de vent relative

### Abréviations

RNG: Reynolds normalisation group

NACA: National Advisory ~~Committee~~ for Aeronautics

## Introduction Générale

Le croisement catastrophique de la pollution atmosphérique pour l'environnement et les personnes à partir des centrales de production d'électricité basé sur les énergies fossiles (pétrole, gaz, charbon). Les gouvernements sont orientés vers des énergies renouvelables qui sont propres et sans danger ; Parmi ces énergies renouvelables où beaucoup de pays c'est diriger vers. Les énergies renouvelables (eau, vent, soleil) sont aujourd'hui de plus en plus utilisées dans la production de l'électricité. Ces énergies propres et gratuites représentent une bonne alternative aux ressources fossiles. Parmi les sources renouvelables dénombrées, on compte l'énergie éolienne qui connaît, depuis quelques décennies, un formidable développement.

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. Il y a Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (à axe vertical ou axe horizontal). Et aussi différents configurations d'un système éolienne (à vitesse fixe et a vitesse variable).

*Le but de ce mémoire* est simulation d'une pale l'éolienne NACA 4412, et étude l'effet des quelques paramètres géométriques avec la vitesse de vents dans la zone d'EL OUED.

*Ce mémoire est organisé en trois chapitres comme suit :*

Cette mémoire comprend une introduction générale.

Dans le premier chapitre, il est donne un ensemble de définition et de notion en relation avec les types d'éoliennes et les composants d'une pale éolienne et les différents types de pales.

Dans Le deuxième chapitre nous utilisons les équations qui déterminent les paramètres de forme de la pale selon chaque théorie, Génération des profils NACA et caractéristiques géométrie d'une pale d'éolienne (Le pale NACA 4412 d'une éolienne d'un Alliage d'aluminium). , Formulations et les équations de mouvement de la pale.

Le troisième chapitre, nous présentons une simulation numérique de la pale par l'(ANSYS) pour déterminer les fréquences propres, les modes propres, les contraintes et les déplacements et le résultat.

Et on termine par une conclusion générale.

## CHAPITRE I : Généralités sur l'énergie éolienne

### I-1-L'énergie éolienne

L'énergie d'origine éolienne fait partie des énergies renouvelables.

L'aérogénérateur utilise l'énergie cinétique du vent pour entraîner l'arbre de son rotor : celle-ci est alors convertie en énergie mécanique elle-même transformée en énergie électrique par une génératrice électromagnétique accouplée à la turbine éolienne [1].

Ce couplage mécanique peut être soit direct si la turbine et la génératrice ont des vitesses du même ordre de grandeur, soit réalisé par l'intermédiaire d'un multiplicateur dans le cas contraire. Enfin il existe plusieurs types d'utilisation de l'énergie électrique produite : soit elle est stockée dans des accumulateurs, soit elle est distribuée par le biais d'un réseau électrique ou soit elle alimente des foyers isolés. Le système de conversion éolien est également le siège de pertes : à titre indicatif, le rendement est de 59 % au rotor de l'éolienne, de 96% au multiplicateur ; il faut de plus prendre en compte les pertes de la génératrice et des éventuels systèmes de conversion.

#### I-1-1-Définition de l'énergie éolienne

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice (Figure. I-1) [2].

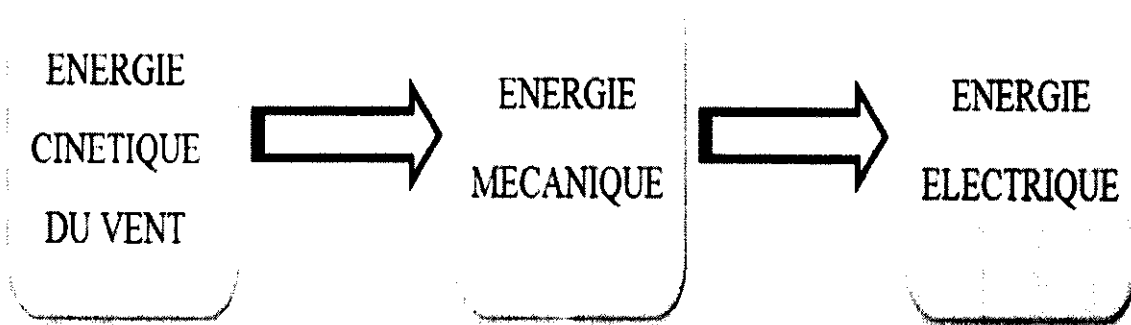


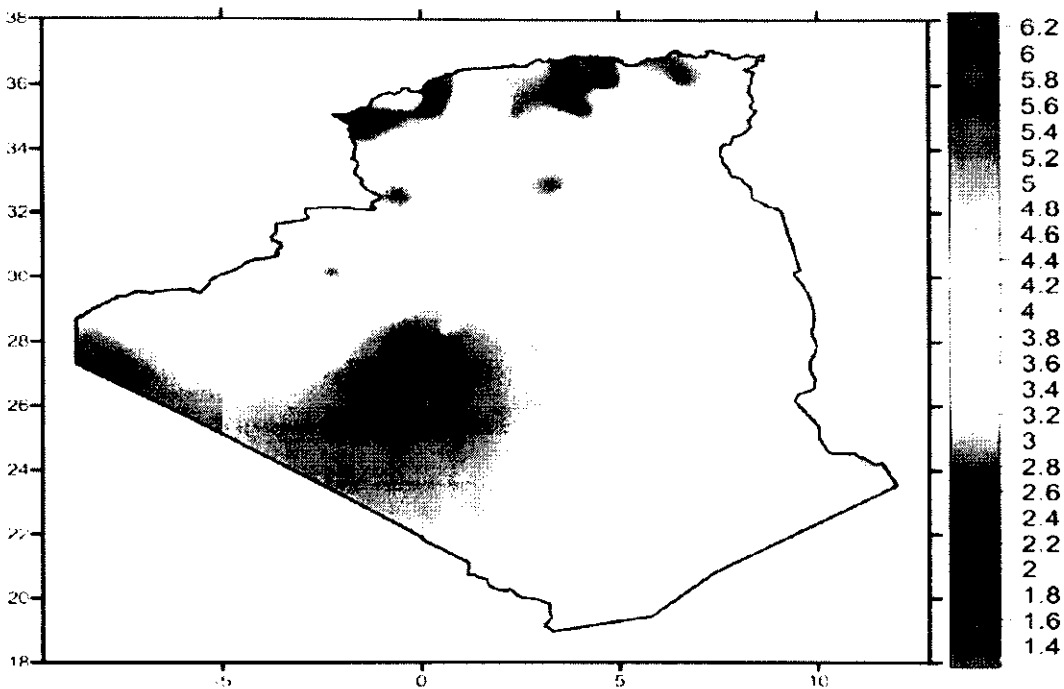
Figure I-1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent [2]

#### I-1-2-L'énergie éoliennes en Algérie

Les premiers travaux Algériens sur le potentiel éolien ont été publiés en 1984, suivis en 1985, en 1990, en 1994 et 2002 [3].

### I-1-3-Potentiel du vent en Algérie

Les cartes des vents de l'Algérie, estimées à 10 m du sol. Les vitesses moyennes annuelles obtenues varient de 2 à 6.2 m/s. On remarque que la majorité du territoire se trouve classé dans la gamme de vitesses allant de 3 à 4 m/s, (région des Hauts Plateaux et le Sahara). Les vitesses du vent augmentent et sont maximales dans les régions situées au centre du grand Sahara (Adrar, In Salah et Timimoune). On distingue plusieurs microclimats, à savoir autour d'Oran, In Amenas, ainsi que les environs de Biskra, où les vitesses de vent enregistrées sont supérieures 4 m/s. Enfin, la côte Ouest de la méditerranéenne, le Hoggar, ainsi que la région de Béni- Abbes présentent les vitesses moyennes annuelles les plus faibles (< 3 m/s) [4].



**Figure I-2:** Atlas de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimée à 10 m d'altitude du sol

En fin, la région centrale de l'Algérie est caractérisée par des vitesses du vent variantes de 3 à 4 m/s, et augmente au fur et à mesure que l'on descend vers le sud-ouest, le maximum est obtenu pour la région d'Adrar avec une valeur moyenne de 6.2 m/s. Cependant, on notera l'existence de plusieurs microclimats où la vitesse excède les 5 m/s comme dans les régions de Tindouf et Oran [4].

## I-2-Les différents types d'éoliennes

Tout d'abord, il faut noter qu'il existe un grand nombre de dispositifs permettant de capter l'énergie éolienne pour la transformer en énergie mécanique. Une classification méthodique, universellement adoptée fait apparaître des groupes, des noms et des formes de ces capteurs.

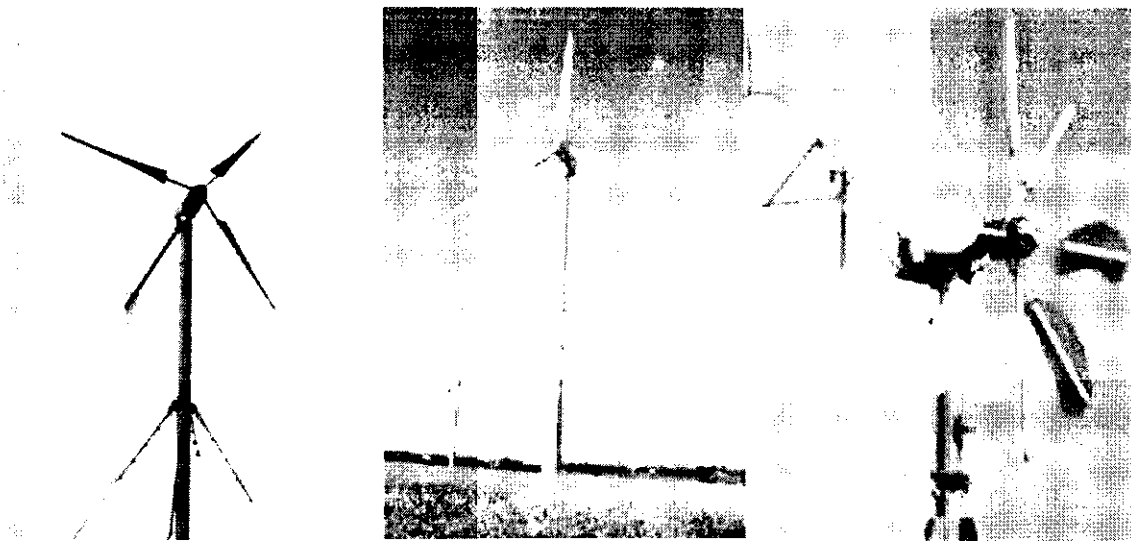
Généralement, on classe les capteurs éoliens selon l'orientation de leur axe de rotation par rapport à la direction du vent. On distingue de cette manière deux types d'éolienne : [5]

- *les éoliennes à l'axe horizontal.*
- *les éoliennes à l'axe vertical.*

### I-2-1-Les éoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à l'axe horizontal sont des machines actuellement les plus répandues à cause de leur bon rendement. Elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pales, des hélices multiples pour le pompage de l'eau. On peut distinguer les capteurs éoliens dont l'hélice est en amont par rapport au vent, et ceux dont l'hélice est en aval par rapport au vent.

Ce type d'éolienne nécessite un gouvernail qui lui permettra de suivre la direction du vent, ce qui va alourdir la machine et augmente son encombrement [5].



**Figure I-3:** Technologie éolienne à axe horizontale

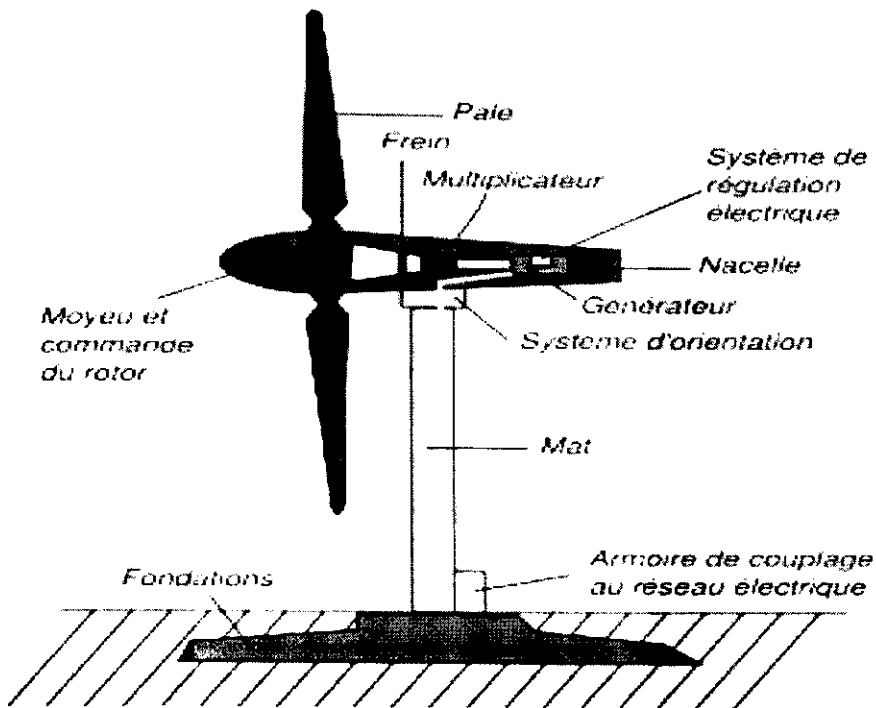


Figure I-4: Schéma d'une éolienne de type aérogénérateur [6]

### I-2-1-a-Les avantages

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

Ainsi, il n'est pas nécessaire de rajouter un local pour l'appareillage.

### I-2-1-b-Les inconvénients

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

### I-2-2-Les éoliennes à l'axe vertical

Ce type d'éolienne se caractérise par leur axe de rotation qui est perpendiculaire à la direction d'incidence du vent. Les éoliennes à axe vertical présentent des qualités

particulièrement intéressantes pour des échelles de production d'énergie plus modestes. D'autre part, ce type d'éolienne permet l'emplacement des générateurs sur terre, ce qui facilite fortement les opérations de maintenance et procure une souplesse de fonctionnement [5].

### **I-2-2-a-Les avantages**

- La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur, la génératrice et les appareils de commande directement au sol.
- Son axe vertical possède une symétrie de révolution ce qui permet de fonctionner quel que soit la direction du vent sans avoir à orienter le rotor.
- Sa conception est simple, robuste et nécessite peu d'entretien [5].

### **I-2-2-b-Les inconvénients**

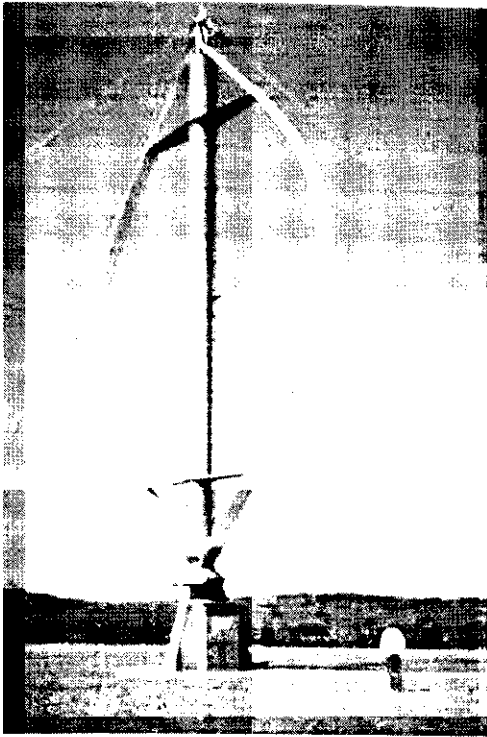
- Elles sont moins performantes que celles à l'axe horizontal.
- La conception verticale de ce type d'éolienne impose qu'elle fonctionne avec un vent proche du sol, donc moins fort car freiné par le relief.
- Leur implantation au sol exige l'utilisation des tirants qui doivent passer au-dessus des pales, donc occupe une surface plus importante que l'éolienne à tour [5].

Il existe deux familles d'éoliennes à l'axe vertical :

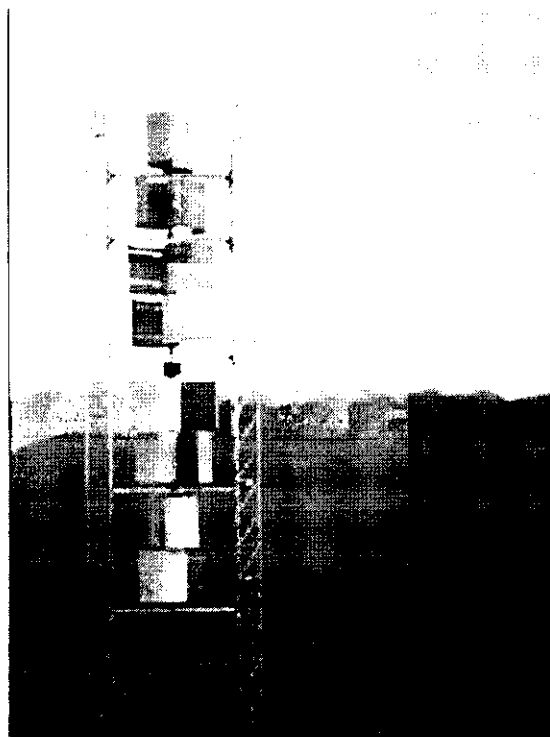
**Éolienne Savonius** : c'est une éolienne à l'axe vertical. Elle a été inventée par l'ingénieur finnois Sigurd Savonius en 1924 et a été affirmée en 1929 [7].

Le fonctionnement du rotor de Savonius est basé sur un couple aérodynamique induit par la déflexion de l'écoulement sur les pales.

**Éolienne de Darrius** : Le principe est celui d'un rotor d'axe vertical qui tourne au centre d'un stator à ailettes. Ce type de solution réduit considérablement le bruit tout en autorisant le fonctionnement avec des vents supérieurs à 220 Km/h [8].



Darrieus



Savonius

Figure I-5 : Eoliennes à axe vertical

### I-3- Les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne

#### I-3-1- Les avantage

Outre les nombreux avantages qu'elle partage avec les autres sources renouvelables d'énergie, l'exploitation de l'énergie du vent présente une série d'avantages propres.

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, c'est à dire que contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier.
- chaque unité d'électricité produit par un aérogénérateur supplante une unité d'électricité qu'aurait été produit par une centrale consommant des combustibles fossiles. Ainsi, l'exploitation de l'énergie éolienne évite déjà aujourd'hui l'émission de 6.3 millions de tonnes de CO<sub>2</sub>, 21 mille tonnes de SO<sub>2</sub> et 17.5 mille tonnes de NO<sub>2</sub>. Ces émissions sont les principaux responsables des pluies acides.
- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'est l'énergie nucléaire et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs dont on connaît la durée de vie.

- les pales éoliennes se démontent très facilement et ne laissent pas de trace.
- Les frais de fonctionnement sont assez limités étant donné le haut niveau de fiabilité et la relative simplicité des technologies mises en œuvre.

### **I-3-2- Les inconvénients**

Le principal inconvénient est le coût élevé d'un projet éolien (de l'étude à l'exploitation).

- Les vents peuvent parfois souffler à des intensités irrégulières ;
- Les éoliennes sont parfois bruyantes et modifient le paysage d'une région (ex.: une déforestation de la zone doit être effectuée);
- Le bruit: il a nettement diminué, notamment le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur. Le bruit aérodynamique quant à lui est lié à la vitesse de rotation du rotor, et celle-ci doit donc être limitée.
- La production dépend de l'intensité des vents et non de la demande en énergie.
- Quant à l'impact des éoliennes sur les oiseaux, plusieurs études scientifiques ont démontré que la plupart des oiseaux identifient et évitent l'hélice qui tourne. Il est néanmoins essentiel de s'assurer que le lieu d'un projet d'implantation d'éoliennes ne se situe pas dans un couloir de migration d'oiseaux, ni à proximité d'un site de reproduction [9].

### **I-4- Eléments constitutifs d'un aérogénérateurs (à axe horizontal) [10]**

L'aérogénérateur utilise l'énergie cinétique du vent pour entraîner l'arbre de son rotor : cette énergie cinétique est convertie en énergie mécanique qui est elle-même transformée en énergie électrique par une génératrice électromagnétique solidaire au rotor. L'électricité peut être envoyée dans le réseau de distribution, stockée dans des accumulateurs ou utilisée par des charges isolées.

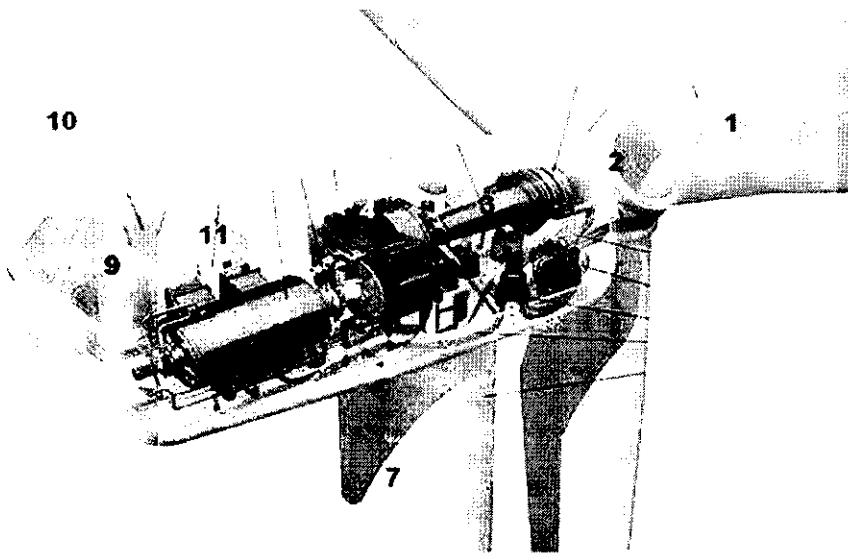


Figure I-6 : Les composantes de l'aérogénérateur

1. **Les pales** : sont les capteurs de l'énergie cinétique qui transmettent l'énergie au rotor
2. **Le moyeu** : il est pourvu d'un système qui permet d'orienter les pales pour réguler la vitesse de rotation.
3. **L'arbre primaire (ou arbre lent)** : relie les pales au multiplicateur.
4. **Le multiplicateur** : il permet de réduire le couple et d'augmenter la vitesse. C'est l'intermédiaire entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire.
5. **L'arbre secondaire** : il amène l'énergie mécanique à la génératrice. Il est équipé d'un frein à disque mécanique qui limite la vitesse de l'arbre en cas de vents violents.
6. **Le générateur électrique** : il assure la production électrique. Sa puissance peut atteindre jusqu'à 5 MW. Il peut-être une dynamo (produit du courant continu) ou un alternateur (produit du courant alternatif). L'alternateur est le plus utilisé pour des raisons de coût et de rendement.
7. **Le mât** : c'est un tube en acier, pilier de toute l'infrastructure. Sa hauteur est importante : plus elle augmente, plus la vitesse du vent augmente mais en même temps le coût de la structure augmente. En général, le mat a une taille légèrement supérieure au diamètre des pales

8. **Le système d'orientation de la nacelle** : c'est une couronne dentée équipée d'un moteur qui permet d'orienter l'éolienne et de la verrouiller dans l'axe du vent grâce à un frein.

9. **Le système de refroidissement** : il est à air, à eau ou à huile et destiné au multiplicateur et à la génératrice.

10. **Les outils de mesure du vent** : girouette pour la direction et anémomètres pour la vitesse. Les données sont transmises à l'informatique de commande.

11. **Le système de contrôle électronique** : il gère le fonctionnement général de l'éolienne et de son mécanisme d'orientation.

### **I-5-Les composants d'une pale éolienne [10]**

#### **-Plusieurs éléments caractérisent ces pales :**

*- la longueur*

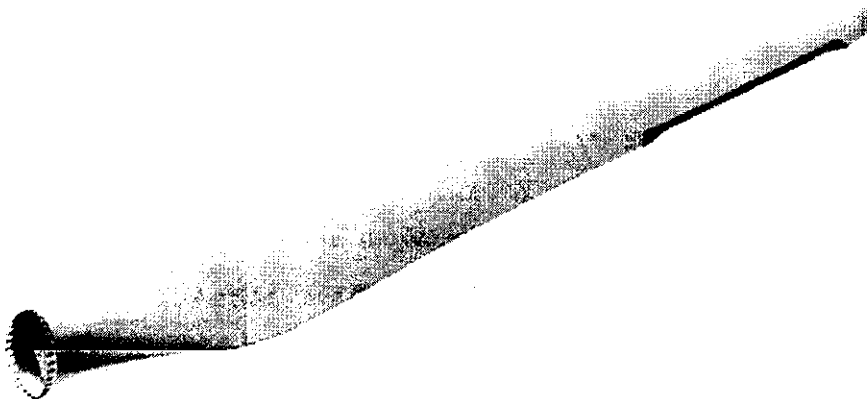
*- la largeur*

*- le profil*

*- les matériaux*

*- le nombre*

Parmi ces éléments, certains sont déterminés par les hypothèses de calcul, puissance et couple et d'autres sont choisis en fonction de critères tel que : coûts, résistance au climat ...



**Figure I-7: Le pale éolienne**



**Figure I-8 : Pale effilée [11]**



**Figure I-9 : Pale à section constante [11]**

### **Longueur**

-Le diamètre de l'hélice est fonction de la puissance désirée. La détermination de ce diamètre fixe aussi la fréquence de rotation maximum, que l'hélice ne devra pas dépasser pour limiter les contraintes en bout de pales dues à la force centrifuge. Il est essentiel de prendre en compte le travail en fatigue des pales et les risques de vibrations, surtout pour les très longues pales.

### **Largeur**

-La largeur des pales intervient pour le couple de démarrage qui sera d'autant meilleur que la pale sera plus large. Mais pour obtenir des vitesses de rotation élevées, on préférera des pales fines et légères. Le résultat sera donc un compromis.

### **Le profil**

Il est choisi en fonction du couple désiré.

Pour la plupart des aérogénérateurs de moyenne et de faible puissance, les pales ne sont pas vrillées. Par contre, pour la plupart des machines de grande puissance ( $\geq 100$  kW), elles le sont, c'est-à-dire qu'elles prennent la forme d'une hélice.

## Les matériaux

Les matériaux utilisés pour la réalisation des pales sont donc essentiels et doivent répondre à plusieurs exigences : ils doivent être assez légers, résistants à la fatigue mécanique, à l'érosion et à la corrosion, et de mise en œuvre ou d'usinage simple.

- **-Le bois** : il est simple, léger, facile à travailler et il résiste bien à la fatigue mais il est sensible à l'érosion, peut se déformer et est réservé pour des pales assez petites.
- **Le lamellé-collé** : c'est un matériau composite constitué d'un empilement de lamelles de bois collées ensemble. Il est possible de réaliser des pales jusqu'à 5 à 6 m de longueur ayant une bonne tenue en fatigue.
- **Les alliages d'aluminium** : pour des pales allant principalement jusqu'à 20 m de longueur.
- **Les matériaux composites** : leur intérêt est de permettre la réalisation de toutes les formes et dimensions, ainsi que d'obtenir les caractéristiques mécaniques exactes recherchées : pale vrillée, corde évolutive, changement de profil.

### I-6-Les différents des profils d'une pale

Les profils de pales sont classés selon la forme respective de l'intrados et de l'extrados: Le profil plane convexe porte bien même à faible incidence mais il est légèrement instable. Il est surtout utilisé en aviation générale.



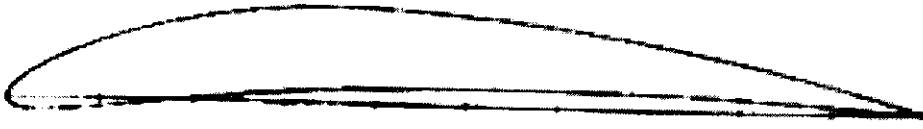
Figure I-10 : profil plane convexe.

Le profil biconvexe dissymétrique porte bien également, même à incidence nulle et est très stable. Il est très utilisé dans l'aviation de loisir.



Figure I-11 : profil biconvexe dissymétrique.

Le profil cambré ou creux est très porteur mais il est assez instable, lorsque l'incidence augmente, il cherche à cabrer.



**Figure I-12** : profil cambré au creux.

Le profil biconvexe symétrique ne porte pas aux faibles et très faibles incidences. Il n'est intéressant que pour les gouvernes et la voltige.



**Figure I-13** : profil biconvexe symétrique.

Le profile double courbure (auto stable) présente l'avantage d'une grande stabilité mais une portance moyenne et une trainée assez forte [12].



**Figure I-14** : profil double courbure.

## CHAPITRE II : Modélisation mathématique

### II-1- Caractéristiques géométrie d'une pale d'éolienne

L'élément le plus important dans une machine éolienne rapide ou lente est la pale, l'étude de la pale amène à l'étude des profils qui correspond à une section transversale de la pale, tout d'abord on commence par donner quelque définition concernant un profile sur le schéma suivant [12]:

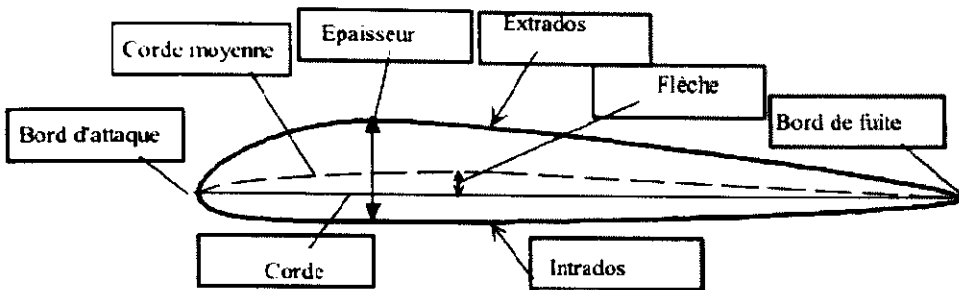


Figure II-1: Profile d'une pale.

### II-2- Quelque type de profils NACA :

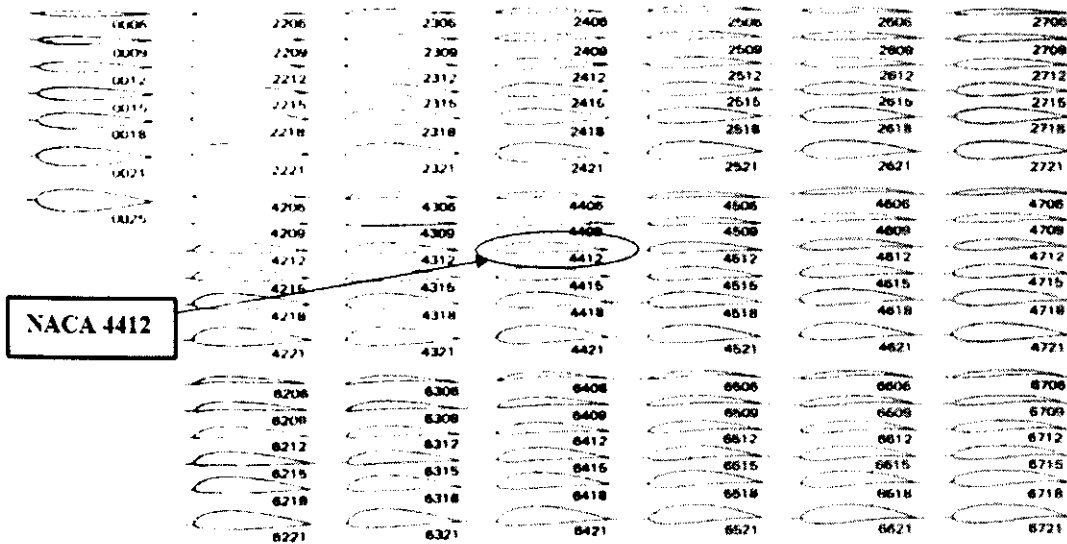


Figure II-2 : Quelque type de profils NACA [13]

## II-3- Désignation d'un profil :

Plusieurs familles des profils d'ailes ont été conçues et testées. Les plus utilisés de nos jours, sont les profils NACA (National Advisory Committee for Aeronautics). Ils sont couramment utilisés, ce qui les rend pratiques dans la validation des méthodes numériques. Il y'a plusieurs classifications des profils NACA. Les plus utilisés sont ont des désignations à quatre et à cinq chiffres. Ces chiffres nous renvoient aux caractéristiques géométriques du profil, Comme exemple:

### II-3-1- NACA à quatre chiffres

Dans cette famille, un profil est représenté par quatre chiffres. Le premier indique la cambrure ou courbure relative maximale en pourcentage de la corde ; le deuxième représente la position de cette cambrure en pourcentage de la corde et les deux derniers spécifient l'épaisseur relative maximale en pourcentage de la corde. Par exemple, dans le cas du profil 4412 :

- ✓ Le 4 indique la cambrure maximale (4%)
- ✓ Le deuxième 4 indiquent la position de la cambrure maximale (40%)
- ✓ Le 12 indique l'épaisseur relative maximale (12%). [14]

### II-3-2- NACA à cinq chiffres

Dans cette famille, cinq chiffres caractérisent les profils. Le premier représente la courbure relative maximale, les deux suivants indiquent le double de sa position relative du bord d'attaque et les deux derniers spécifient l'épaisseur relative maximale. [15]

## II-4- Caractéristique aérodynamique d'une pale d'éolienne :

### II-4-1- Action de l'air sur pale en mouvement :

On considère une pale en mouvement par rapport à l'air. L'expérience montre que dans le cas où la pale est disposée comme indiquée sur la figure II-3 par rapport au vecteur  $\vec{V}$ , il y a une suppression sur l'intrados et une dépression à l'extrados [16,12].

Pour représenter l'action de l'air en chaque point du profile ; on porte habituellement sur des droites perpendiculaires au profile et à des longueurs proportionnelles aux pression locales comme illustré sur la figure suivante :

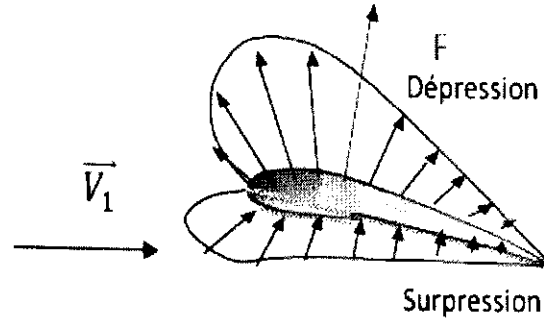


Figure II-3 : Pressions générées par le mouvement du vent autour une section de la pale.

$$K_p = \frac{p-p_0}{\rho_0 v_0^2} \tag{II.1}$$

$p$  : désignant la pression statique à la paroi au pied de la perpendiculaire.

$p_0$ ,  $\rho_0$  et  $v_0$ : Les conditions à l'infini.

L'action de l'air sur le corps se traduit par une force résultante  $F$  généralement oblique par rapport à la direction de la vitesse relative  $V$ . Cette force s'appelle action aérodynamique totale ou plus simplement résistance de l'air [12].

Elle a pour expression:  $F^* = \frac{1}{2} C_T W^2 S \tag{II.2}$

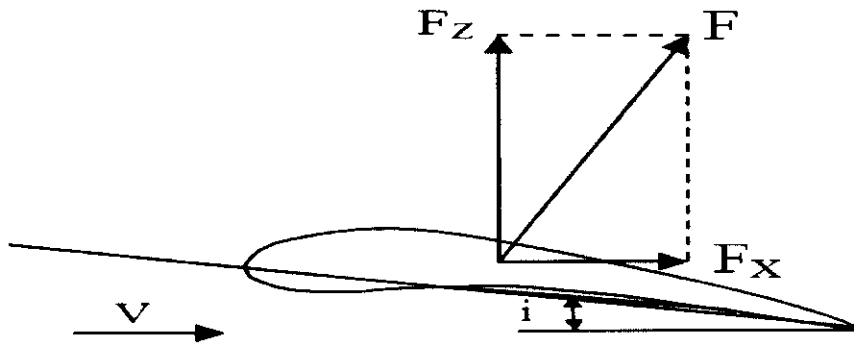


Figure II-4 : Les composantes de la force aérodynamique

- $F^*$ : force aérodynamique totale.
- $F_z$ : force de portance.
- $F_x$ : force de trainée.
- **La force de portance** : est une force perpendiculaire au 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, elle est définie par [12]:

$$F_z = \frac{1}{2} \rho S C_z V^2 \tag{II.3}$$

- **La force de trainée:** est la force de résistance qu'exerce un profil lorsque le fluide ou l'objet est en mouvement l'un par rapport à l'autre, cette force est parallèle à la trajectoire du fluide, elle est dirigée dans le sens du mouvement du fluide et elle s'oppose à l'avancement de l'objet, elle est définie par [12] :

$$F_x = \frac{1}{2} \rho S C_x V^2 \quad (\text{II.4})$$

$\rho$  : masse volumique de l'air en kg/m<sup>3</sup>

S: surface de l'aile en m<sup>2</sup>

V<sup>2</sup>: vitesse en m/s

C<sub>T</sub>: un coefficient sans dimension appelé coefficient aérodynamique total

C<sub>Z</sub> : coefficient de portance du profil

C<sub>X</sub> : coefficient de trainée du profil

Les coefficients de portance C<sub>Z</sub> et de trainée C<sub>X</sub> sont déterminés expérimentalement en soufflerie.

D'après le théorème de Pythagore on a:  $F^2 = F_x^2 + F_z^2$  (II.5)

➤ **Coefficient de portance :**  $C_z = 2F_z / \rho V^2 S$  (II.6)

➤ **Coefficient de trainée :**  $C_x = 2F_x / \rho V^2 S$  (II.7)

➤ **Résultante aérodynamique (Ra) :**  $R_a = \frac{1}{2} \rho S V^2 C_r$  (II.8)

L'aération des performances d'un profil de pale éolienne revient à augmenter le rapport de la portance à la trainée. [17]

## II-5- Equation gouvernantes : [18]

Les équations régissant le problème sont les équations de continuité, qui expriment la Conservation de masse, et de quantité de mouvement. Pour une formulation simple du problème, Nous allons supposer quelques hypothèses.

### ❖ Hypothèses simplificatrices :

Nous supposons, alors, que :

- L'écoulement est instationnaire
- L'écoulement est bidimensionnel.

- Fluide est un incompressible
- Fluide est visqueux.
- Absence de transfert de chaleur.

Compte tenu des hypothèses précédentes, les équations de base régissant l'écoulement sont  
Données respectivement par :

### II-5-1- Equation de continuité :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (\text{II-9})$$

### II-5-2- Equation de quantité de mouvement suivant x :

$$u \frac{\partial(u)}{\partial x} + V \frac{\partial(u)}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + V \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \overline{u' u_2'} \quad (\text{II-10})$$

### II-5-3- Equation de quantité de mouvement suivant y :

$$u \frac{\partial(u)}{\partial x} + V \frac{\partial(u)}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + V \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \overline{u_2'^2} \quad (\text{II-11})$$

## II-6- Le modèle de turbulence :

IL existe plusieurs modèles de fermeture. Comme le modèle K- $\epsilon$  (STANDARD et RNG) et le modèle de spalart-Allmaras, dans cette étude nous utilisons le module de turbulence k- $\epsilon$  STANDARD. [18]

### II-6-1- Modèle (k- $\epsilon$ ) : [18]

C'est un modèle à deux équations de transport pour deux paramètres de turbulence proposé par Jones et lauder (1972) qui se base sur le concept de Boussinesq (1877) utilisant l'analogie entre l'échange de quantité de mouvement par interaction moléculaire à l'échelle microscopique (contraintes visqueuses) et l'échange de quantité de mouvement par la turbulence à l'échelle macroscopique (contraintes de Reynolds). L'idée du modèle k- $\epsilon$  est que l'on peut construire à partir de ces quantités une « viscosité turbulente propre à l'écoulement », où la viscosité turbulente est donnée par la relation suivante.:

$$V_t = C_u \left( \frac{K^2}{\varepsilon} \right) \tag{II-12}$$

Avec :

$\mu_t = V_t \rho$  viscosité dynamique turbulence

L'expérience montre que cette relation est bien vérifiée pour des écoulements à grand nombre de Reynolds à condition d'avoir une turbulence homogène.

$C_\mu$  : est un coefficient sans dimension qui doit être évalué expérimentalement

K : est l'énergie cinétique de turbulence défini par :

$$K = \frac{1}{2} \overline{u_i^2} = \frac{1}{2} (\overline{u_1^2} + \overline{u_2^2} + \overline{u_3^2}) \tag{II-13}$$

$\varepsilon$  : Le taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulence K donné par la suivante :

$$\varepsilon = V \overline{\left[ \frac{\partial u_i'}{\partial x_j} \right]^2} \tag{II-14}$$

Ce terme de dissipation qui apparaît dans l'équation de l'énergie cinétique turbulence reste à déterminer. L'échelle typique de longueur des grosses structures de la turbulence L est déduite

de :

$$\varepsilon = \frac{K^3}{L} \tag{II-15}$$

**II-6-1-a- Equation modélisée de K :**

L'équation modélisée de l'énergie cinétique turbulence s'écrit sous forme semi-empirique suivante [19] :

$$\underbrace{\frac{\partial k}{\partial t} + \bar{U}_j \frac{\partial k}{\partial x_j}}_1 = V_t \underbrace{\left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}}_2 + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_j} \left( \left( \frac{\nu}{\sigma_{k,l}} + \frac{V_t}{\sigma_{k,l}} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right)}_3 - \underbrace{\varepsilon}_4 \tag{II-16}$$

Les termes de l'équation (II-16) sont dénommés comme suit :

- 1- Représente le taux de variation de l'énergie cinétique K
- 2- Représente le transport par diffusion de l'énergie cinétique
- 3- Représente la production par cisaillement de l'énergie cinétique turbulence

4- Représente la dissipation de l'énergie cinétique turbulence K.

**II-6-1-b- Equation modélisée de  $\mathcal{E}$  :**

La forme modélisée de l'équation de transport du taux de dissipation de l'énergie cinétique s'exprime [19] :

$$\underbrace{\frac{\partial \mathcal{E}}{\partial t} + \bar{U}_j \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial x_j}}_1 = C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{K} V_t \underbrace{\left( \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j}}_2 + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_j} \left( \left( \frac{\nu}{\sigma_{\epsilon, l}} + \frac{\nu_t}{\sigma_{\epsilon, l}} \right) \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial x_j} \right)}_3 - \underbrace{C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{K}}_4 \quad \text{(II-17)}$$

Les 1.2.3.4 de l'équation (II-17) sont :

- 1- Représente le taux de variation de  $\mathcal{E}$ .
- 2- Représente le taux production (source) de  $\mathcal{E}$ .
- 3- Représente le transport par diffusion de la dissipation de l'énergie turbulence.
- 4- Représente la dissipation (puits) de  $\mathcal{E}$ .

**II-6-2- Modèles des constantes :**

Pour rendre le système d'équations opérationnel on adopte les constants standards du modèle donné par Launder et Spalding (1974) [13]. Elles sont réunies dans le tableau suivant :

$C_\mu$	$C_{\epsilon 1}$	$C_{\epsilon 2}$	$C_{\epsilon 3}$	$C_{\epsilon 4}$
0.09	1.44	1.92	1.0	1.0

**Tableau II-1 : Coefficients du modèle K- $\mathcal{E}$  standard. [13]**

**II-6-3- Nombre de Mach :**

Le nombre de Mach est un nombre sans dimension, noté « Ma », il mesure le rapport entre les forces liées au mouvement et la compressibilité du fluide.

$$M_a = \frac{v}{a} \quad \text{(II-18)}$$

Est vitesse de propagation ou célérité du son dans l'environnement considéré. Elle représente la vitesse de propagation de tout ébranlement produit dans le milieu. La Vitesse du son dans l'air, considéré comme un gaz parfait, s'exprime par :

$$a = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}} \quad (\text{II-19})$$

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v} \quad (\text{II-20})$$

$c_p$  et  $c_v$  étant les capacités thermiques massiques isobare et isochore. Ce nombre ne dépend que du nombre d'atomes dans la molécule et vaut 1,4 pour l'air. L'équation d'état permet de la réécrire en fonction de la constante spécifique du gaz  $r$  (287/J/kg K pour l'air) et de la température  $T$  en kelvins :

$$va = \sqrt{\gamma r T} \quad (\text{II-21})$$

On peut négliger la compressibilité de l'air pour les nombres de Mach inférieurs à 0,3 environ. Le cas sonique défini précédemment comme frontière entre le subsonique et le supersonique n'a pas de réalité physique : il est remplacé par une zone de transition assez large, dite transsonique, dans laquelle les phénomènes sont particulièrement compliqués. [13]

#### II-6-4- Nombre de Reynolds :

Soit l'écoulement de vitesse caractéristique  $\underline{U}$ , de dimension caractéristique  $\underline{L}$ , d'un fluide de masse volumique  $\underline{\mu}$  et de viscosité  $\underline{\eta}$ . Le nombre de Reynolds caractéristique de cet écoulement est le nombre sans dimension :

$$R_e = \frac{\mu UL}{\eta} = \frac{UL}{\nu} \quad (\text{II-22})$$

Où  $\nu = \eta/\mu$  est la viscosité cinématique du fluide. La longueur caractéristique  $\underline{L}$  est le diamètre d'une conduite, ou la dimension d'un obstacle.

- $Re < 2000$  : écoulement laminaire
- $Re > 4000$  : écoulement turbulent
- Pour  $2000 < Re < 4000$ , on observe un régime de transition. [13]

#### II-7- Le principe de Bernoulli

C'est formulé en 1738 par le mathématicien et physicien suisse Daniel Bernoulli, et antérieurement par Leonhardt Euler. Le principe de Bernoulli montre que la vitesse du fluide

augmente lorsque la pression exercée sur le fluide diminue. Cette loi a été appliquée pour optimiser la forme du profil pale éolienne.

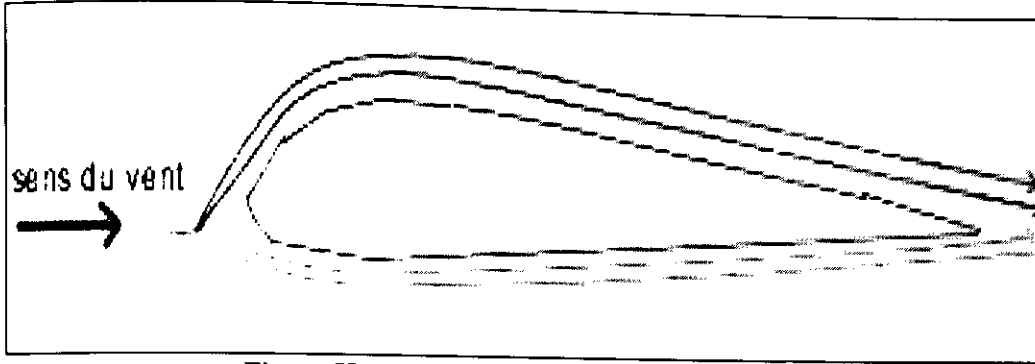


Figure II-5 : distribution de la vitesse de l'air

On remarque que la flèche rouge est plus longue que la verte, donc que la vitesse de l'air au-dessus de l'aile sera plus grande que celle au-dessous de l'aile, car dans un même temps, l'air passant au-dessus du profil aura parcouru une plus grande distance.

En effet, la forme d'une aile est telle que l'air y circule plus rapidement sur sa surface supérieure (extrados) que sur sa surface inférieure (intrados). De ce fait, la pression de l'air sur l'extrados est inférieure à celle qui s'exerce sur l'intrados. [19]

### II-7-1- Equation de Bernoulli

$$P_{stat} + \left( \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho g z \right) = \text{constante} \quad (\text{II-23})$$

$P_{stat}$  : est la pression en un point (en Pa ou  $\text{N/m}^2$ )

$\rho$  : est la masse volumique en un point (en  $\text{kg/m}^3$ )

$v$  : est la vitesse du fluide en un point (en  $\text{m/s}$ )

$g$  : est l'accélération de la pesanteur (en  $\text{N/kg}$  ou  $\text{m/s}^2$ )

$Z$  : est l'altitude (en m)

### II-7-2- Equation simplifiée de Bernoulli

$$P_{stat} + P_{dyn} = P_{tot} \quad (\text{II-24})$$

Pression statique + pression dynamique = pression totale

Chaque point dans un fluide en mouvement, indépendamment de la vitesse du fluide en ce point, a sa propre pression statique et dynamique. La somme de ces deux pressions  $p+q$  est

définie comme la pression totale  $p_{tot}$ . Le principe de Bernoulli est de considérer cette pression totale constante. [19]

## II-8-Elément finit

### II-8-1- Etablissement de la relation entre déformations et déplacement

Il s'agit ici de trouver la matrice  $\mathbf{B}$  reliant les déformations  $\epsilon$  de l'élément à ses déplacements nodaux  $\mathbf{U}^e$ . Cette relation est exprimée par :

$$\{\epsilon\} = \mathbf{B}\mathbf{U}^e \quad (\text{II-25})$$

### II-8-2- Etablissement de la relation entre contraintes et déformations

Pour un matériau élastique linéaire, les contraintes  $\sigma$  sont des fonctions linéaires des déformations  $\epsilon$ . Elles sont exprimées par l'expression :

$$\{\sigma\} = [\mathbf{D}]\{\epsilon\} \quad (\text{II-26})$$

Où  $[\mathbf{D}]$  est la matrice d'élasticité.

### II-8-3- Calcul des matrices élémentaires :

Cette étape constitue la partie la plus importante du problème. Les déplacements  $\mathbf{U}^e$  aux nœuds sont déterminés de telle façon que les contraintes engendrées dans l'élément équilibrent le chargement extérieur  $\mathbf{F}^e$ , c'est-à-dire que :

$$\overline{\mathbf{K}^e}\mathbf{U}^e = \overline{\mathbf{F}^e} \quad (\text{II-27})$$

$\mathbf{K}^e$  est la matrice de rigidité de l'élément exprimée dans le repère local. Elle est déduite de l'énergie de déformation de l'élément [20] et exprimée par :

$$\overline{\mathbf{K}^e} = \int_0^V \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} dv \quad (\text{II-28})$$

Il faut aussi calculer la matrice de masse  $\mathbf{M}^e$  de chaque élément. Cette matrice est déduite de l'énergie cinétique de l'élément [20].

Dans le repère local de l'élément, cette matrice est donnée par l'expression :

$$\overline{\mathbf{M}^e} = \int_0^V \rho \mathbf{N}^T \mathbf{N} dv \quad (\text{II-29})$$

Où  $\rho$  est la masse volumique du matériau constituant l'élément. Finalement, on exprime les matrices  $\mathbf{K}^e$ ,  $\mathbf{M}^e$ ,  $\mathbf{U}^e$  et  $\mathbf{F}^e$  dans le repère global défini pour toute la structure.

### II-8-4 Champ des déplacements

$$\theta_x(x, z) = -\frac{\partial u_{0y}}{\partial x} \quad (\text{II-30})$$

$$\theta_z(x, z) = -\frac{\partial u_{0y}}{\partial z} \quad (\text{II-31})$$

Le champ des déplacements s'écrit :

$$u_x(x, y, z) = u_{0x}(x, z) - y \frac{\partial u_{0y}}{\partial x}(x, z) \quad (\text{II-32})$$

$$u_z(x, y, z) = u_{0z}(x, z) - y \frac{\partial u_{0y}}{\partial z}(x, z) \quad (\text{II-33})$$

$$u_y(x, y, z) = u_{0y}(x, z) \quad (\text{II-34})$$

### II-8-5-Déformation

Le champ des déformations s'écrit :

$$\epsilon_{xx} = \frac{\partial u_{0x}}{\partial x} - y \frac{\partial^2 u_{0y}}{\partial x^2} \quad (\text{II-35})$$

$$\epsilon_{zz} = \frac{\partial u_{0z}}{\partial z} - y \frac{\partial^2 u_{0y}}{\partial z^2} \quad (\text{II-36})$$

$$\epsilon_{yy} = 0 \quad (\text{II-37})$$

$$\epsilon_{yz} = 0 \quad \epsilon_{yx} = 0$$

$$\epsilon_{xz} = \left( \frac{\partial u_{0x}}{\partial z} + \frac{\partial u_{0z}}{\partial x} \right) - 2y \frac{\partial^2 u_{0y}}{\partial x \partial z} \quad (\text{II-38})$$

Le tenseur des déformations

$$\epsilon = \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{xz} & 0 \\ \epsilon_{xz} & \epsilon_{zz} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II-39})$$

La matrice des déformations se réduit à trois composantes non nulles :

$$\epsilon = \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{zz} \\ k_{xz} \end{bmatrix} \quad (\text{II-40})$$

### II-8-6- Discrétisation par éléments finis

On pose l'hypothèse de séparation entre l'évolution spatiale et temporelle des champs

$$u(x, y, z) = \sum_{i=1}^{n_e} N_i(x, y) u_i(t) \quad (\text{II-41})$$

Il vient

$$\{u\} = [N]\{q_e\}$$

$$\{\dot{u}\} = [N]\{\dot{q}_e\}$$

$$\{\ddot{u}\} = [N]\{\ddot{q}_e\}$$

La discrétisation du principe de Hamilton donne :

$$\begin{aligned} \{\delta q_e\}^t \int_v ([B_m]^T [A] [B_m] + [B_m]^T [B] [B_f] + [B_f]^T [B] [B_m] + [B_f]^T [D] [B_f] \\ + \rho [N]^t [N] \{\ddot{q}_e\} - [N]^t \{f^u\}) dv - \{\delta q_e\} \int_s [N]^t \{f^u\} ds = 0 \end{aligned}$$

Le système d'équations général est :

$$[M_e]\{\ddot{q}_e\} + [k_e]\{q_e\} = \{f_e\} \quad (\text{II-42})$$

Avec

$$[M_e] = \int_{V_e} \rho [N]^t [N] dV$$

$$[k_e] = \iiint [B_m]^T [A] [B_m] + [B_m]^T [B] [B_f] + [B_f]^T [B] [B_m] + [B_f]^T [D] [B_f] dv$$

$$\{f_e\} = \int_{V_e} [N]^t \{f^u\} dV + \int_{S_e} [N]^t \{f^u\} ds \tag{II-43}$$

$[M_e]$  Est la matrice de masse de l'élément,  $[K_e]$  est la matrice de rigidité et  $\{f_e\}$  est le vecteur des force nodales dans le repère local.

Les matrices  $[M_e]_g, [K_e]_g$  les vecteurs  $\{f_e\}_g$  et  $\{q_e\}_g$  dans le repère global sont :

$$\begin{aligned} [k_e^m]_g &= [T_e^m]^t [K_e^m]_l [T_e^m] \\ [M]_g &= [T_e^m]^t [M_e^m]_l [T_e^m] \\ \{q_e^m\}_g &= [T_e^m]^t \{q_e^m\}_l \\ \{F_e^m\}_g &= [T_e^m]^t \{F_e^m\}_l \end{aligned}$$

Avec g indiquant le repère global. La matrice de passage s'écrit :

$$[T] = \begin{bmatrix} [t^m] & 0 & 0 \\ 0 & [t^m] & 0 \\ 0 & 0 & [t^m] \end{bmatrix}$$

Avec

$$[t^m] = \begin{bmatrix} \cos(x, X) & \cos(x, Y) & \cos(x, Z) \\ \cos(z, X) & \cos(z, Y) & \cos(z, Z) \end{bmatrix}$$

### II-8-7-Procédure de résolution

La procédure est la suivant :

1. évalué les matrice  $[M]$  et  $[k]$
2. évaluer les fréquences propres du système :  $|[M] - \omega^2[k]| = 0$   
On en déduit  $\omega_i$  et  $\{\Phi_i\}$
3. pour chaque mode  $i$ 
  - (a) calculer  $\hat{m}_i$  et  $f_i$
  - (b) résoudre l'équation du mode :  $\dot{Y}_i + \omega_i^2 Y_i = f_i / \hat{m}_i$
4. déterminer la réponse de la structure  $\{q(t)\} = [\Phi]\{Y(t)\}$

### III-1-Introduction

Nous présentons une simulation numérique de la pale par l'logiciel (ANSYS) pour déterminer les fréquences propres et les modes propres, les contraintes et les déplacements et le résultat. Dans cette simulation nous choisis pale à section constante.

### III-2-Le point de profile étudiée NACA 4412

Le profil d'aile étudié est le NACA 4412 (figure III.1), un profil de la série à 4 chiffres. 36 point de 1 à 18 point extradados et de 18 à 36 point intrados. Pour  $b = 1.5$  m longueur de la pale et pour corde  $c = 0.15$  m.

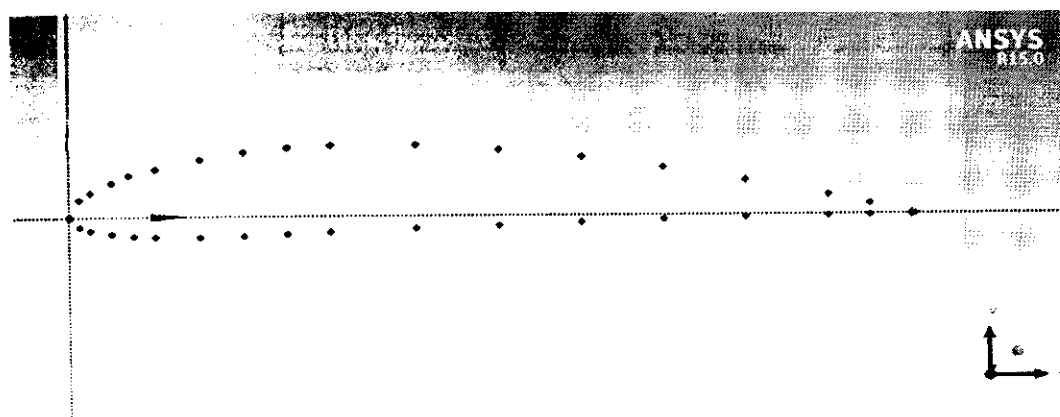


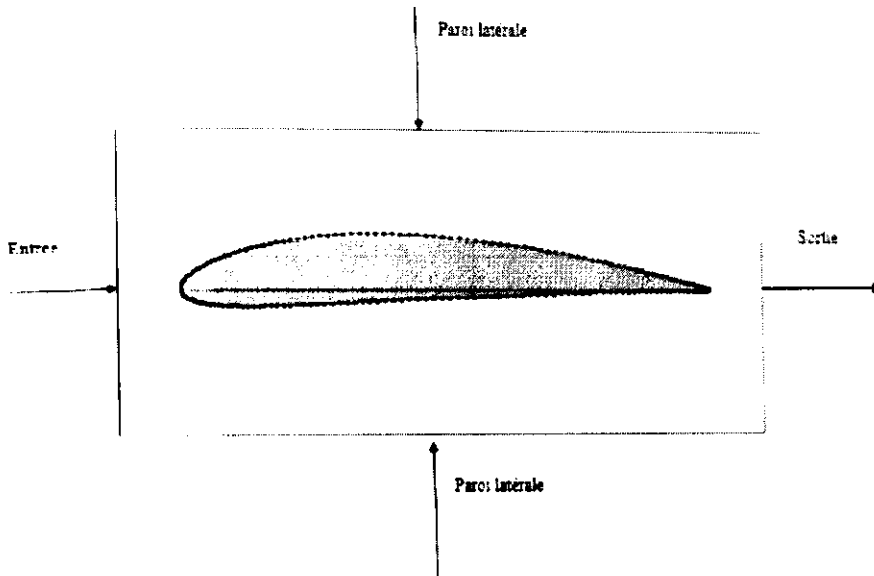
Figure III-1: Point de profil NACA 4412

Point extradados		Point intrados	
x	y	x	y
0	0	0	0
0,15	0,000195	0,001875	-0,00215
0,1425	0,002205	0,00375	-0,00293
0,135	0,004065	0,0075	-0,00374
0,12	0,007335	0,01125	-0,00411
0,105	0,010035	0,015	-0,00429
0,09	0,01221	0,0225	-0,00432
0,075	0,013785	0,03	-0,00411
0,06	0,0147	0,0375	-0,00375
0,045	0,01464	0,045	-0,00339
0,0375	0,014115	0,06	-0,0027
0,03	0,0132	0,075	-0,0021
0,0225	0,011835	0,09	-0,0015
0,015	0,009885	0,105	-0,00098
0,01125	0,00864	0,12	-0,00059
0,0075	0,007095	0,135	-0,00033
0,00375	0,005085	0,1425	-0,00024
0,001875	0,00366	0,15	-0,0002

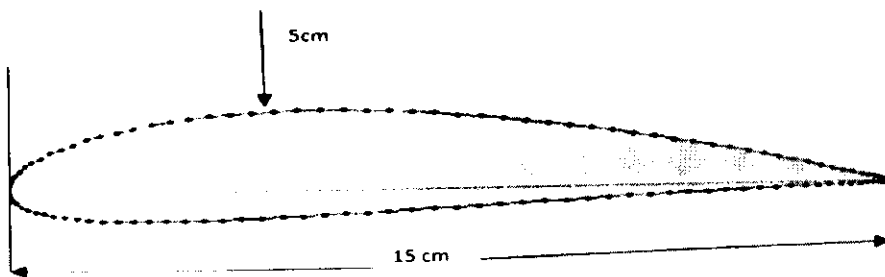
Tableau III-1 Point de profile NACA 4412

### III-3-Géométries de profile

Les configurations géométriques traitées sont présentées ci-dessous. L'écoulement autour d'un profil isolé 2D, le NACA 4412, de la dimension Figure. (III.2), a été simulé à l'aide du code Fluent. Le domaine de calcul est une surface de dimensions 1000cm x2000cm avec une entrée, une sortie et deux cotés latéraux, Figure. (III.3).



**Figure III-2 : Dimension de profil 2D NACA 4412**



**Figure III-3 : Domine de travail simulation 2D pale NACA 4412**

### III-4-FLUENT

FLUENT est un programme de simulation numérique des écoulements de fluide compressibles, incompressibles, stationnaires ou in stationnaires impliquant divers phénomènes physiques tels que le transfert de chaleur, la turbulence, les réactions chimiques, les écoulements dans les machines tournantes, moteurs thermiques, et ce pour des géométries industrielles très complexes.

FLUENT permet aussi le raffinement du maillage en fonction des conditions aux limites, des dimensions et même des résultats déjà obtenus. Cette capacité est particulièrement utile surtout dans les régions à gradients importants comme les couches limites ou zone de

mélange. Enfin toutes les fonctions exigées pour calculer une solution et pour manifester les résultats sont accessibles par une interface pilotée par le menu [20].

### III-4-1-Choix des types de frontières

Les types de frontières entourant le domaine et considérés dans chaque cas étudié dans ce travail sont résumés dans le tableau ci-dessous.

**Tableau III-2:** Types de frontières

Région	Géométries	Profil isolé 2D
	Entrée	Vélocité in let
	Sortie	Outflow
	Paroi	Wall

### III-4-2-Les conditions aux limites au pale NACA 4412

Elles dépendent du type de phénomène physique à étudier, permettant d'identifier les positions des frontières (entrées, sorties, symétrie ...) et spécifier les variables aux frontières (vitesse, pression ...).

- Le pale NACA 4412 d'une éolienne d'un Alliage d'aluminium
- Le fluide considéré est de l'air, le nombre de mach à l'entrée est égal à **0,1**.
- Le nombre de Reynolds est de  **$2,4 \cdot 10^4$**
- Les conditions d'entrée de vitesse : **35.3 m/s** en générale dans la zone d'EL OUED

### III-4-3-Choix des schémas de discrétisation

Les schémas de discrétisation utilisés dans le présent travail sont résumés comme suit :

**Tableau III-3 :** Les schémas de discrétisation

Pression	Standard
Quantité de mouvement	Second ordre upwind
Energie cinétique turbulente	Second ordre upwind
Taux de dissipation	Second ordre upwind
Couplage vitesse-pression	Simple

### III-4-4-Sous relaxation

Dans le présent travail, les facteurs de sous relaxation sont :

**Tableau III-4** : Les facteurs de sous relaxation

Pression	Quantité de mouvement	Energie cinétique turbulente k	Taux de Dissipation
0.3	0.7	0.8	0.8

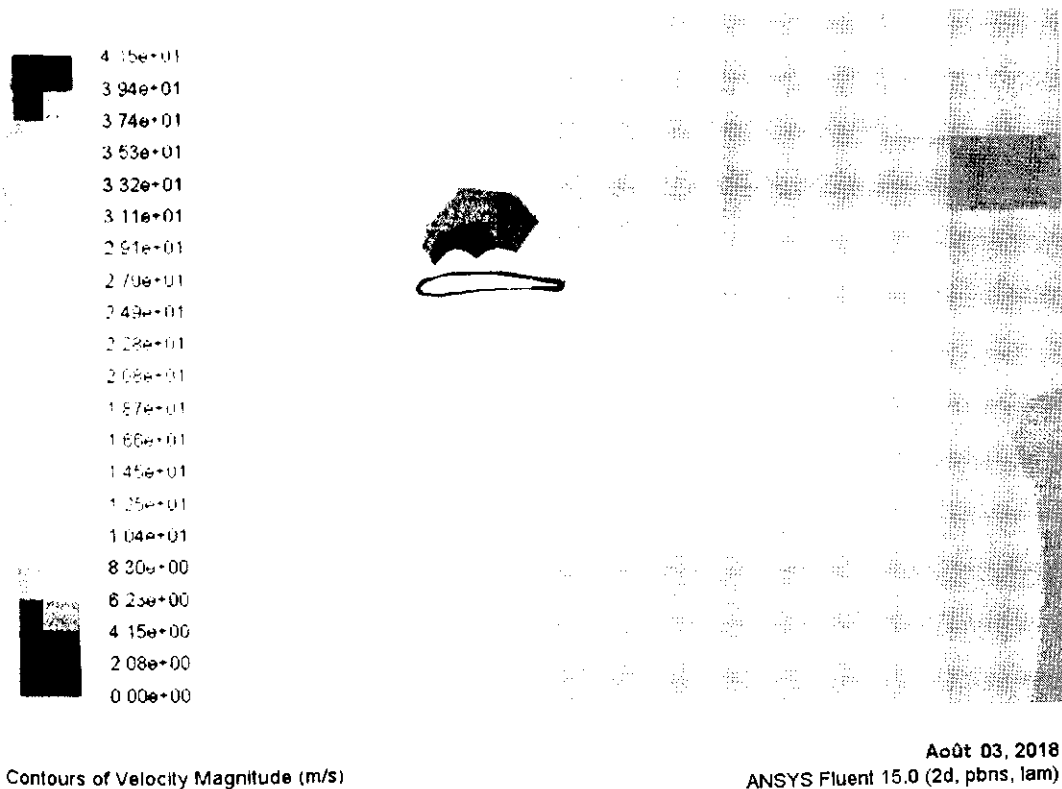
### III-5-Résultats et interprétation

L'objectif de cette étude est de déterminer les effets de la vitesse sur la surface de pale et représente le déferont paramètre dans le cas statique, avec détermination des fréquences et les modes propres du pale NACA 4412.

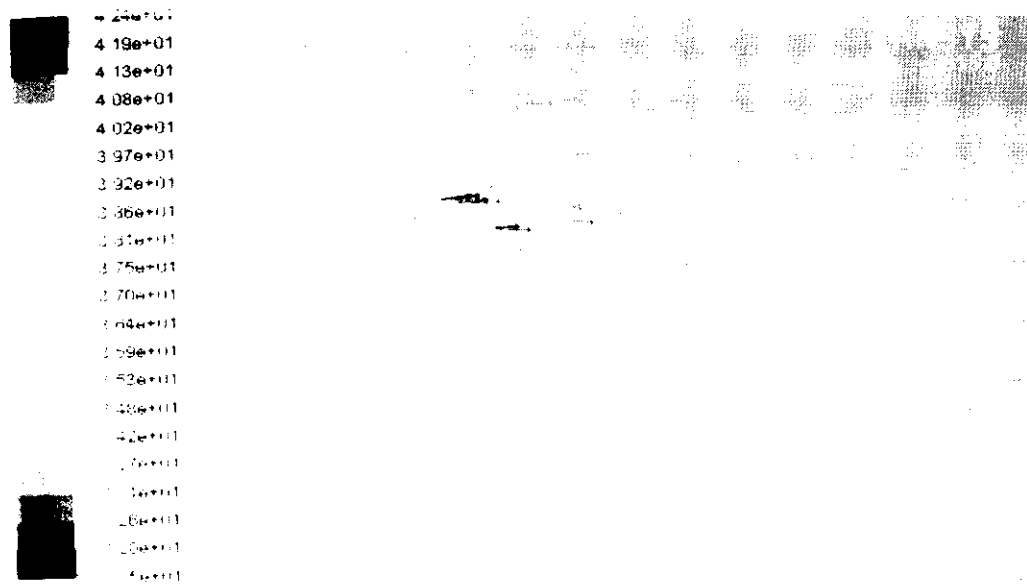
#### III-5-1-Analyse dynamique de solide/fluide

Détermine dans ce résultat l'effet de la vitesse sur la surface de pale et représente l'effet de géomètre sur l'écoulement de fluide. en plus nous offrons les graphs de moment et coefficient de portance et traîne. et la pression.

##### III-5-1-a-L'effet de vitesse sur la pale NACA 4412



**Figure III-4** : Contours de la grandeur de vitesse résultante (m/s)



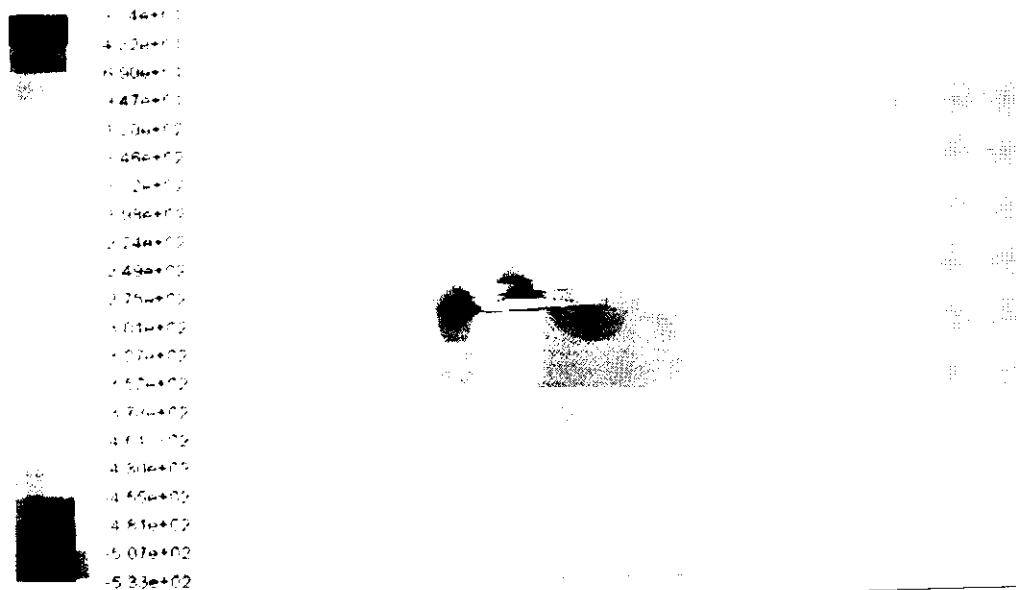
Velocity Vectors Contoured By Velocity Magnitude (m/s)

ANSYS Fluent 15.0 (2d, pbns, lam) Août 03, 2018

Figure III-5 : Contours de la grandeur de vitesse résultante (m/s) dans le pale NACA 4412

Dans cette simulation, nous observons la loi de Bernoulli est vérifié, où la vitesse du extrados est la plus grande par rapport valeur du intrados, qui est appelée la forme géométrique de la pale.

### III-5-1-b-L'effet de pression sur la pale NACA 4412



Contours of Static Pressure (pascal)

ANSYS Fluent 15.0 (2d, pbns, lam) Août 03, 2018

Figure III-6 : Contours de pression statique (Pa).

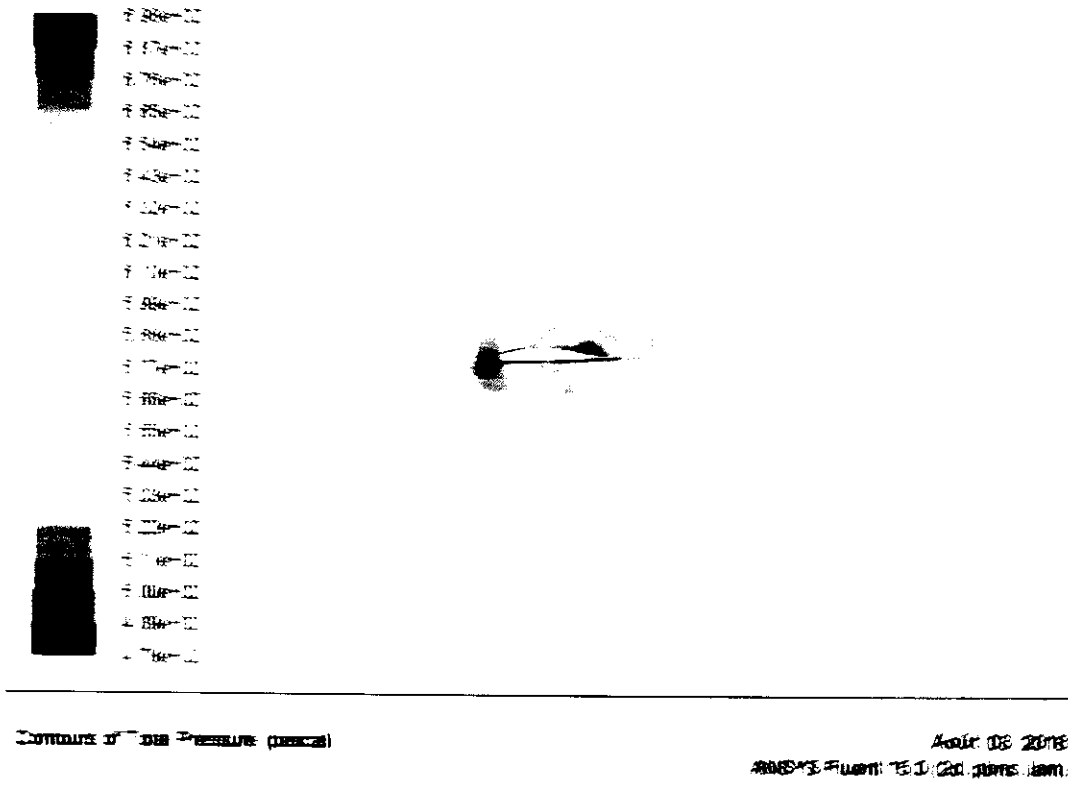


Figure III-7 : Contours de pression totale ( $P_{tot}$ )

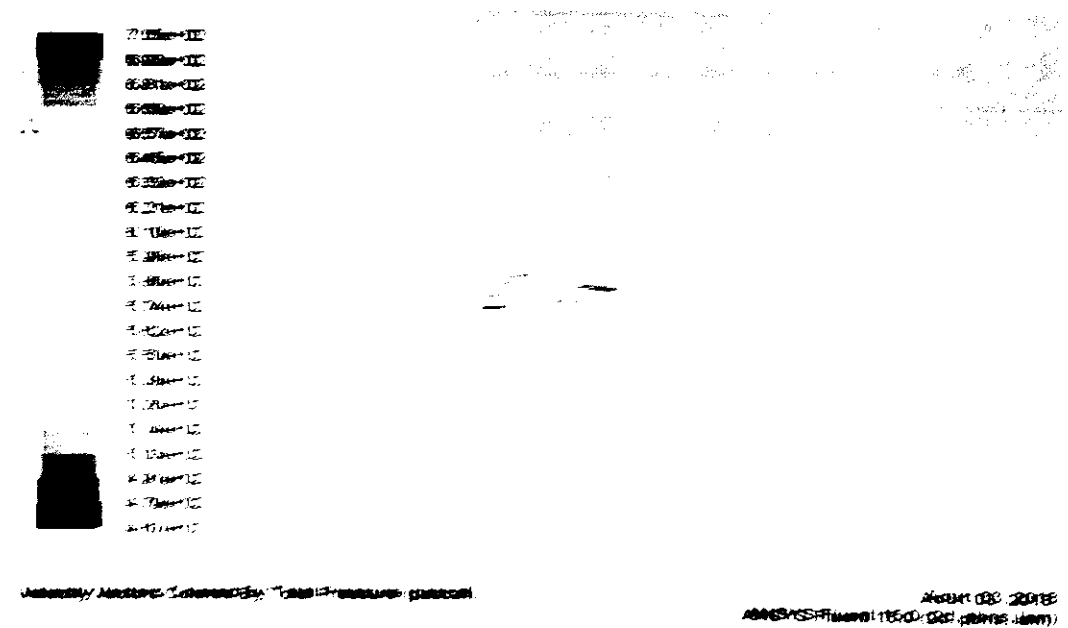
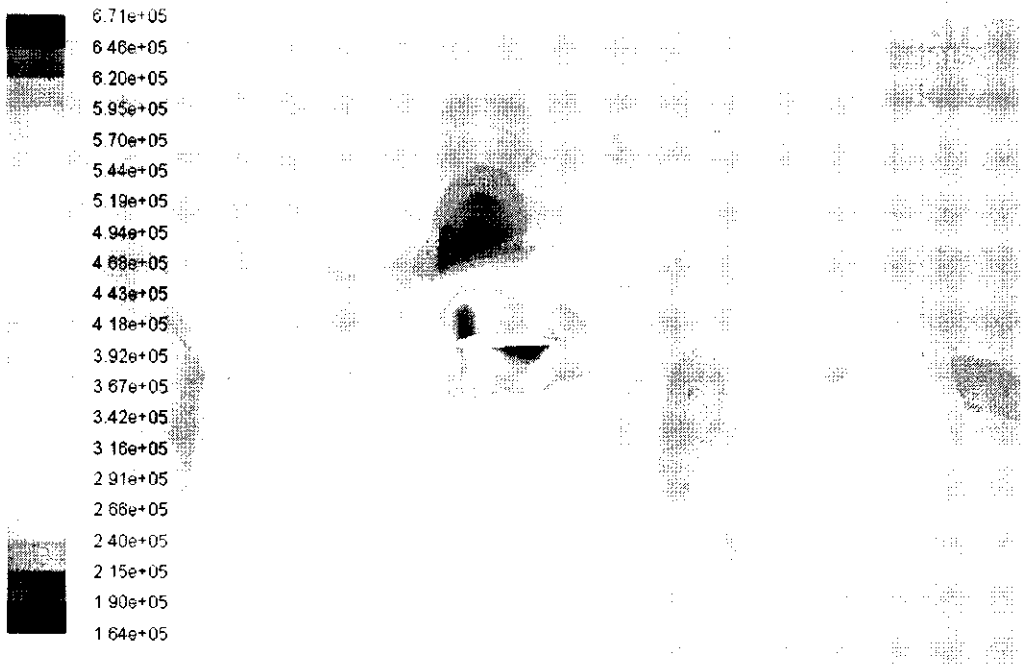


Figure III-8 : Contours de pression statique ( $P_{stat}$ ) dans le pale NACA 4412

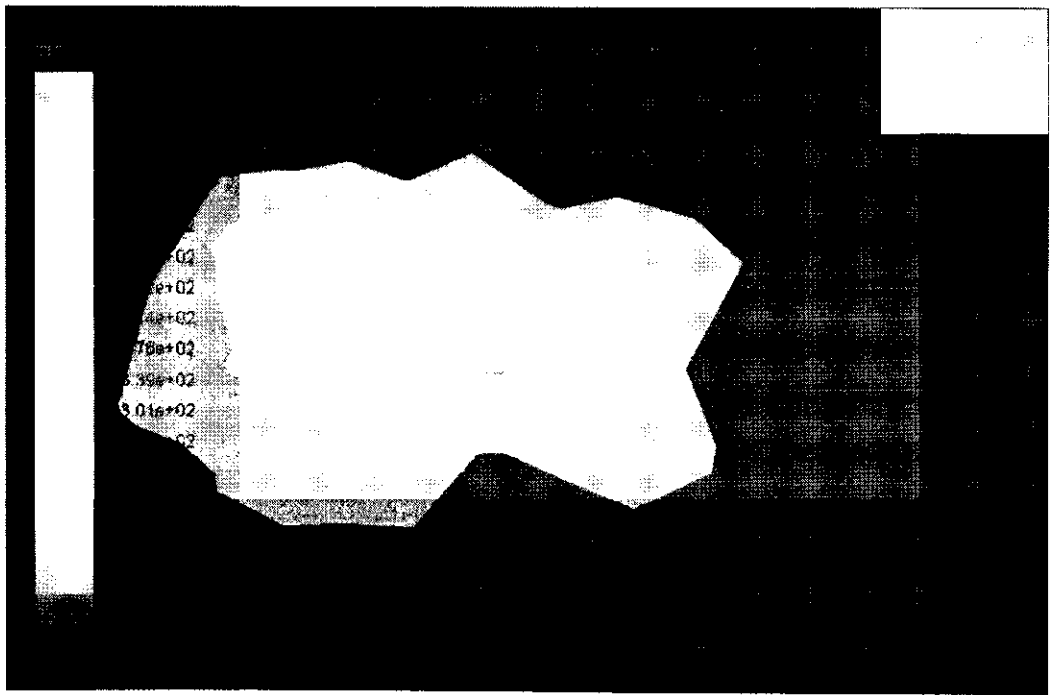
La figure III-7 représente l'effet de la vitesse sur la surface de la pale et transformation de l'énergie en pression une grande application de pression sur le bord d'attaque de la pale et grande application à la vitesse quand le mouvement de rotation



Contours of Cell Reynolds Number

Août 03, 2018  
ANSYS Fluent 15.0 (2d, pbns, lam)

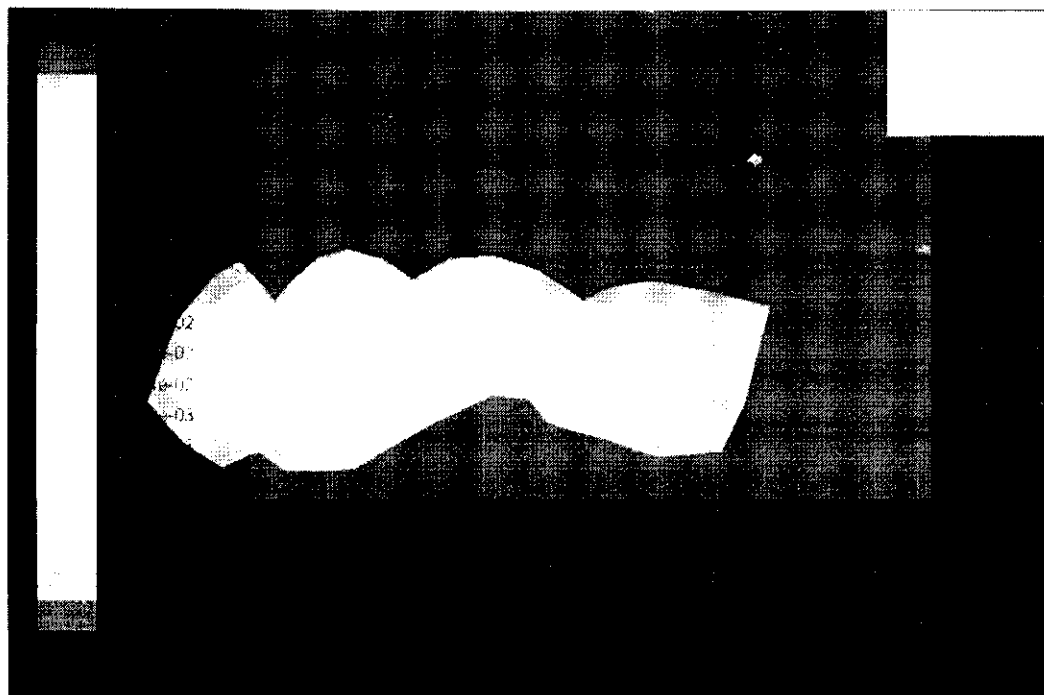
Figure III-9 : Nombre de Reynolds dans le pale NACA 4412.



Contours of Strain Rate (1/s)

Août 03, 2018  
ANSYS Fluent 15.0 (2d, pbns, lam)

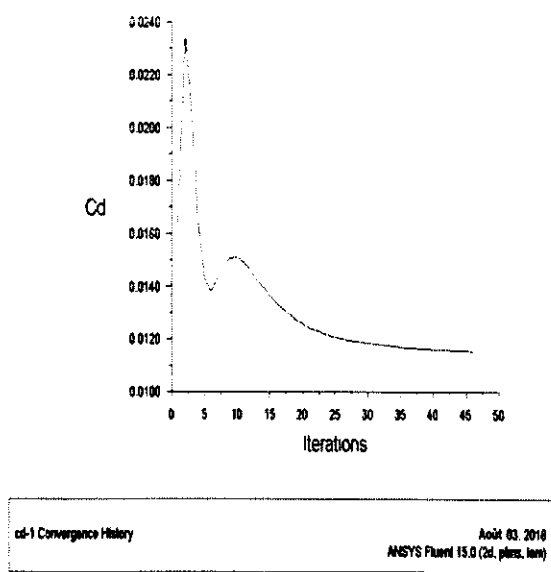
Figure III-10 : contours taux de déformation .



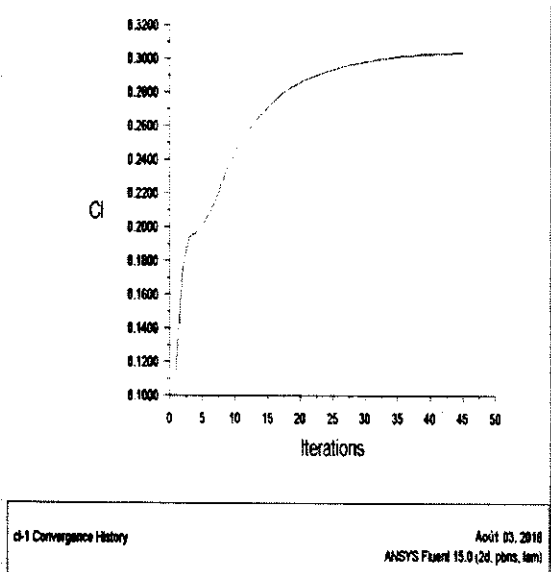
Contours of Wall Shear Stress (pascal)

Août 03, 2018  
ANSYS Fluent 15.0 (2d, pbns, lam)

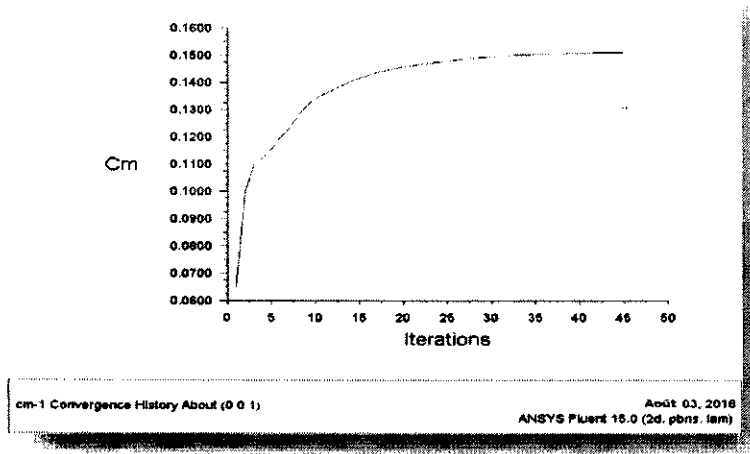
Figure III-11 : Contour de contrainte de cisaillement de mur.



(a)



(b)



(c)

Figure III-12 : Les valeurs Cd et Cl et Cm

Tableau III-5 : La valeur de coefficient de portance et traîne et moment

	Cd	Cl	Cm
Valeur	0.00115	0.304	0.151

### III-5-2-Analyse modale

#### III-5-2-a-Les fréquences naturelles de la pale NACA 4412

Les fréquences de la pale sont présentées dans les tableaux ci-dessous:

Tableau III-6 : Les fréquences naturelles de la pale.

Numéro de mode	Type de mode	Fréquence [Hz] Alliage d'aluminium
1	1 <sup>er</sup> battement	0,85812
2	2 <sup>eme</sup> battement	5,3678
3	1 <sup>er</sup> Traîné	6,6184
4	3 <sup>eme</sup> battement	14,987
5	1 <sup>er</sup> Torsion	19,019
6	4 <sup>eme</sup> battement	29,26

Les fréquences de vibration sont représentées par la fréquence



Figure III-13 : La fréquence en fonction numéro de mode

III-2-b-4- Les déformées modales

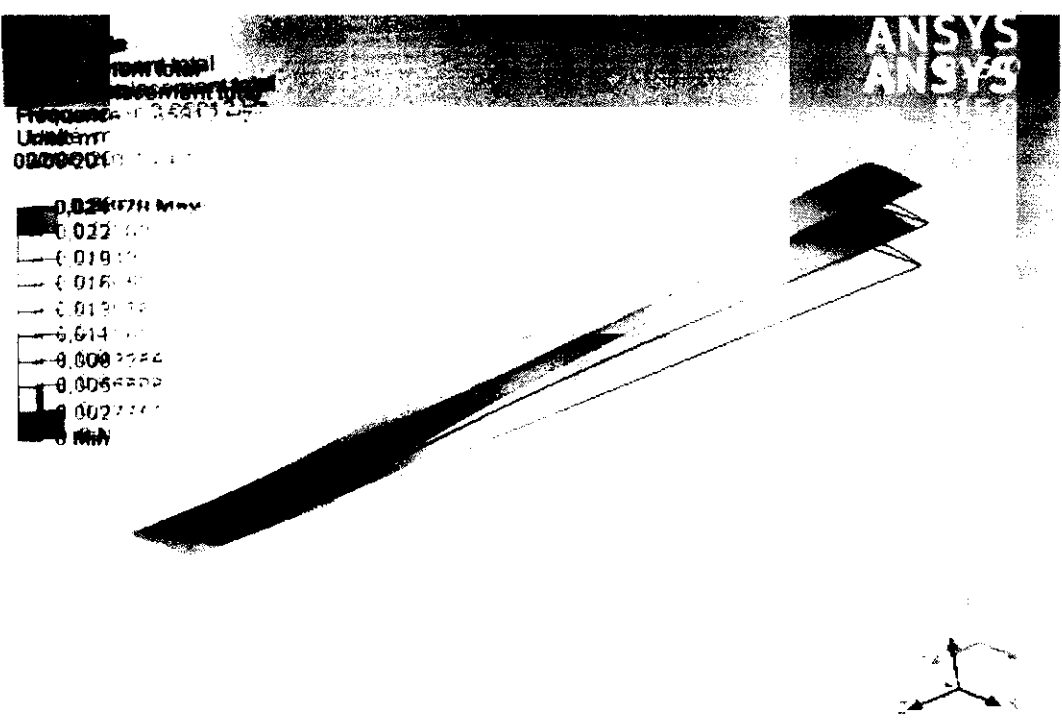


Figure III-14 : Max de la déformée F1 mode 10 (0.0266778 mm) et Min de la déformée F1 mode 10 (0.000000 mm)

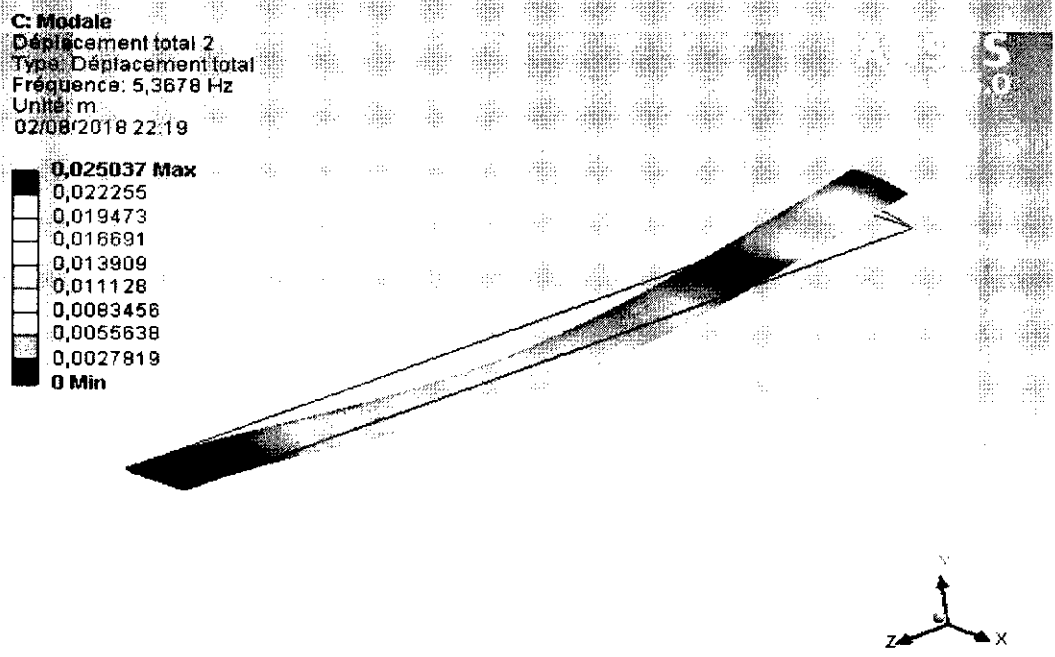


Figure III-15: Mode de 2<sup>ème</sup> déformée 2<sup>ème</sup> mode de battement

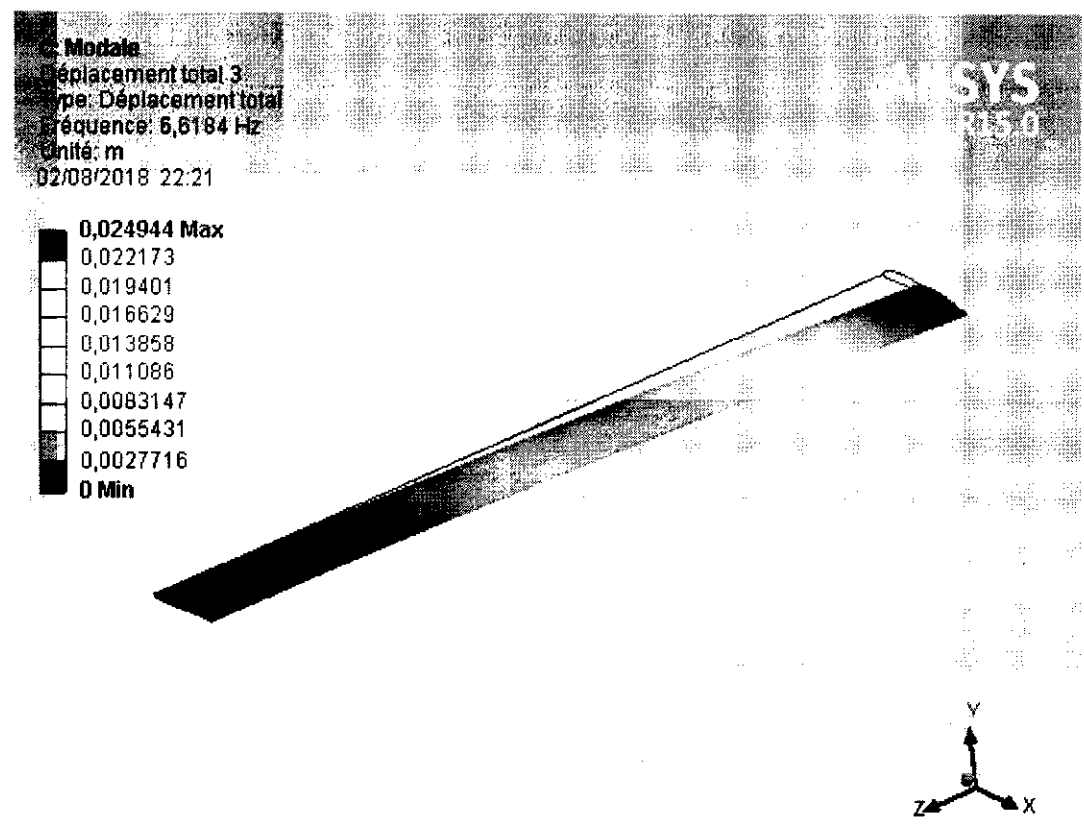


Figure III-16 : Mode de 3<sup>ème</sup> déformée mode de 1<sup>er</sup> Trainé

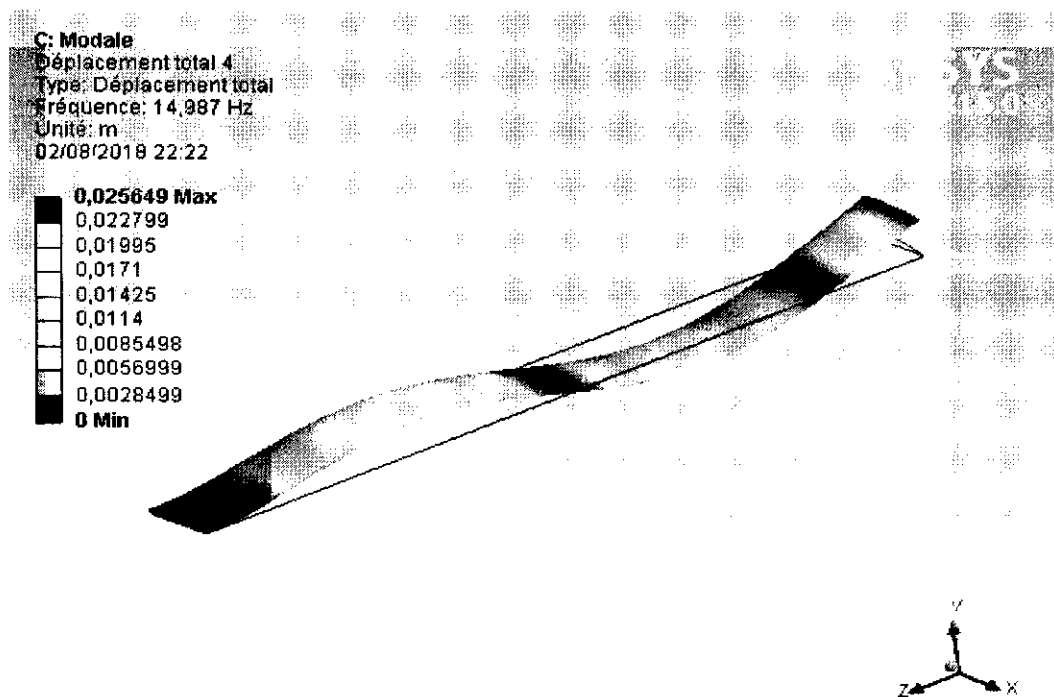


Figure III-17 : Mode de 4<sup>ème</sup> déformée 3<sup>ème</sup> mode de battement

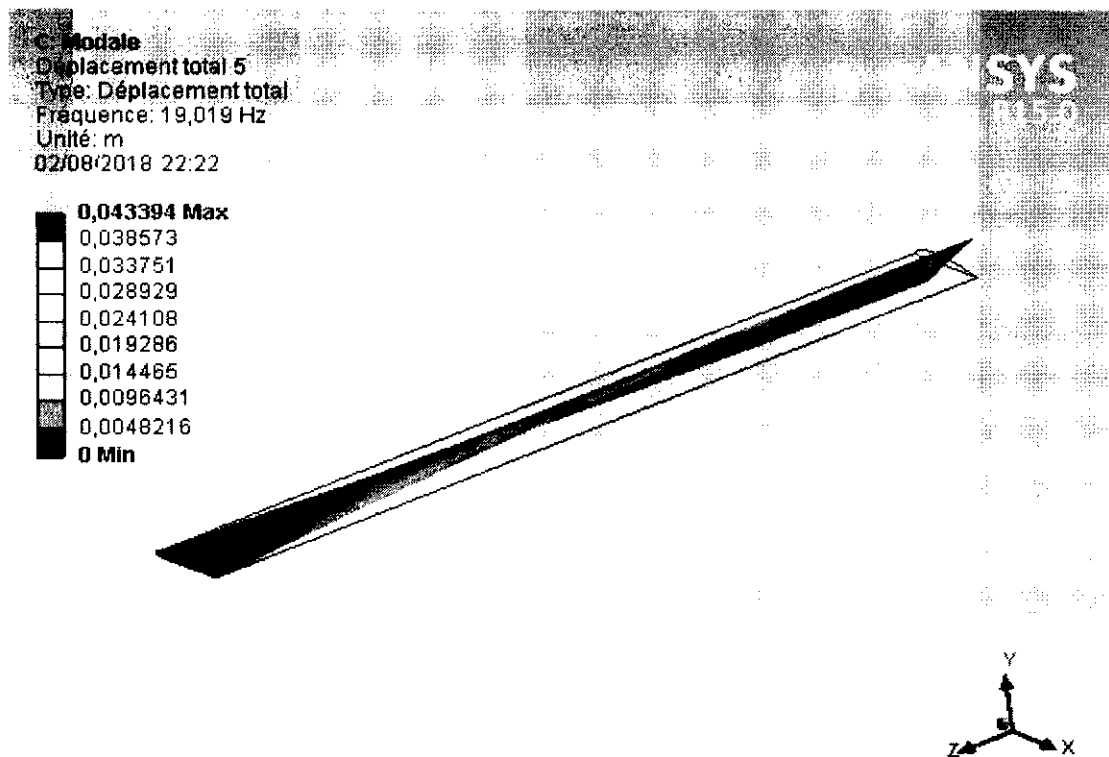


Figure III-18 : Mode de 5<sup>ème</sup> déformée 1<sup>er</sup> mode de torsion

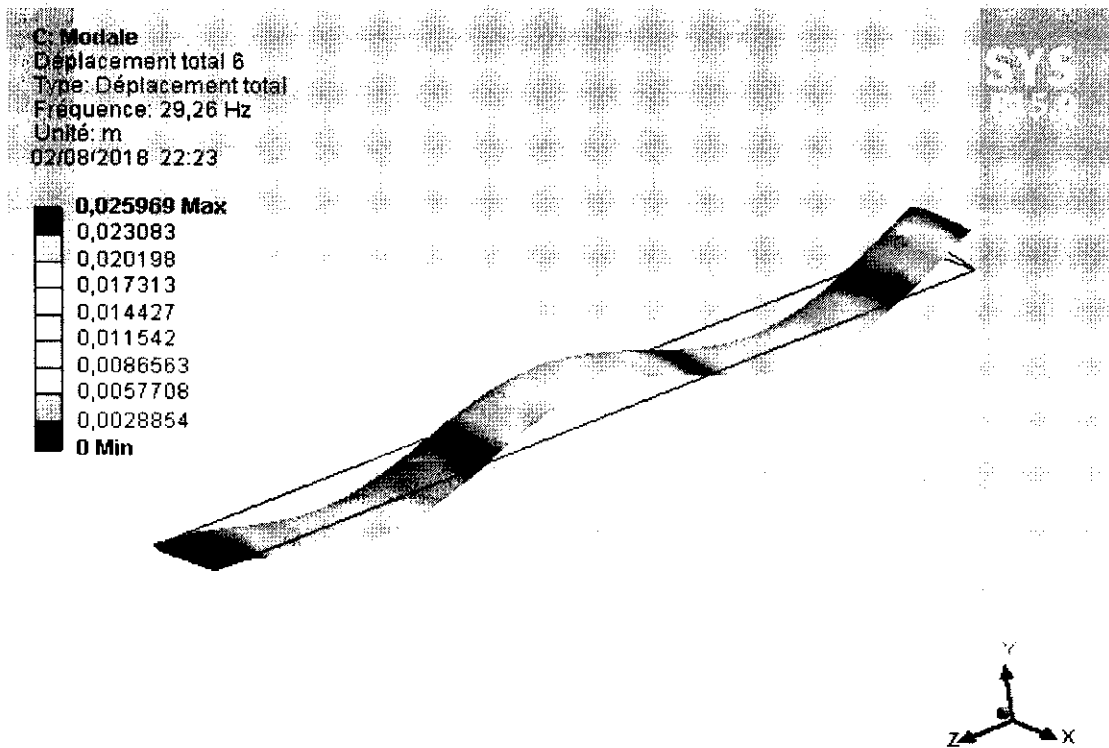


Figure III-19 : Mode de 6<sup>ème</sup> déformée 4<sup>ème</sup> mode de battement

Tableau III-7 : Les déformations Max de la pale

Numéro de mode	Type de mode	Déformation Max [cm] Alliage d'aluminium
1	1 <sup>er</sup> battement	0.024978
2	2 <sup>ème</sup> battement	0.025037
3	1 <sup>er</sup> Trainé	0.024944
4	3 <sup>ème</sup> battement	0.025649
5	1 <sup>er</sup> Torsion	0.043394
6	4 <sup>ème</sup> battement	0.025969

## Déformation max

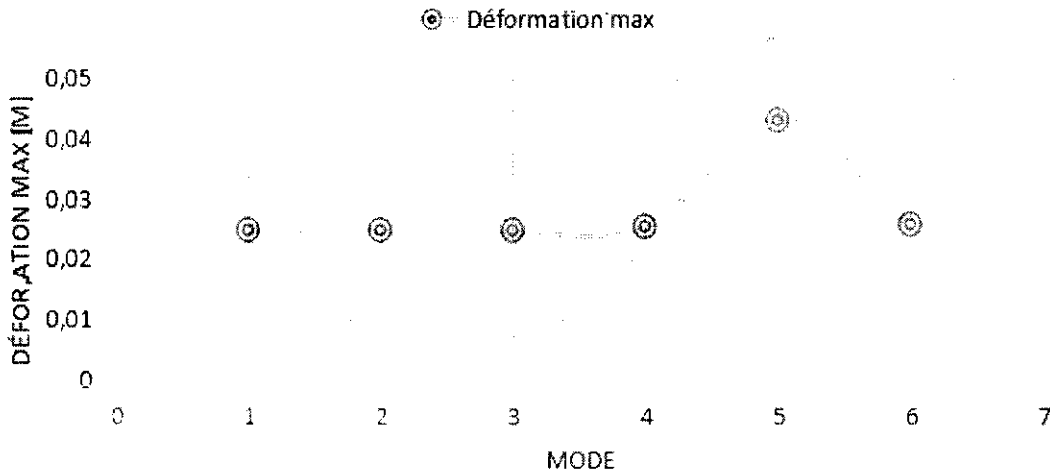
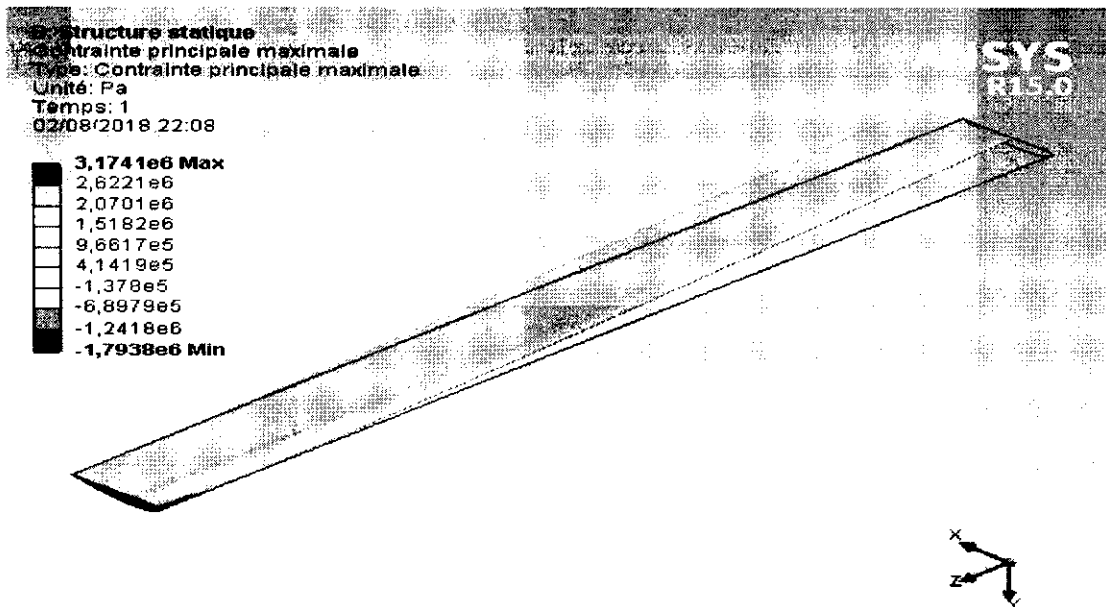


Figure III-20: Les déformation Max de la pale 4412

### III-5-3-Analyse statique

#### III-5-3-a-Les contraintes de la pale NACA 4412

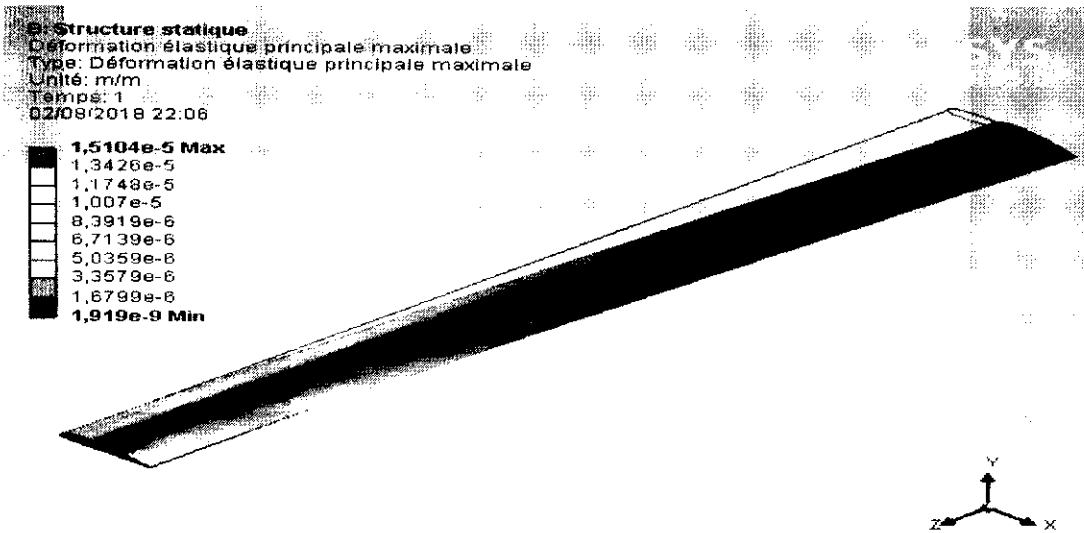


Figures III-21 : La contrainte Max dans le pale NACA 4412

Tableau III-8 : Valeur max de contrainte

La contrainte Max	3,1741 * 10 <sup>6</sup> [Pa]
-------------------	-------------------------------

III-5-3-b-Les déformation de la pale NACA 4412

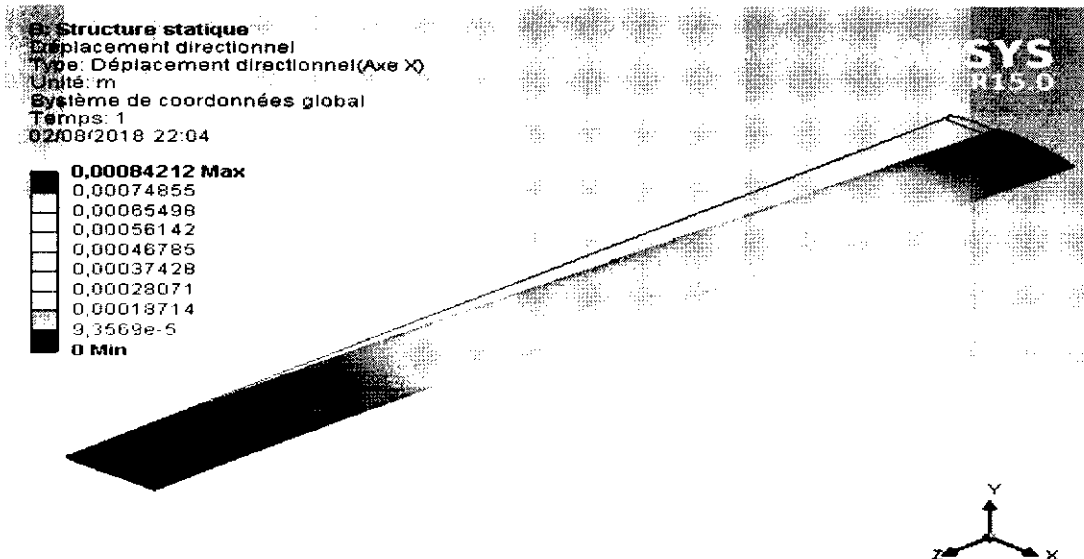


Figures III-22 : La déformation Max de la profile NACA 4412

Tableau III-9 : Valeur de déformation max

la déformation Max	$1,5104 \cdot 10^{-5}$
--------------------	------------------------

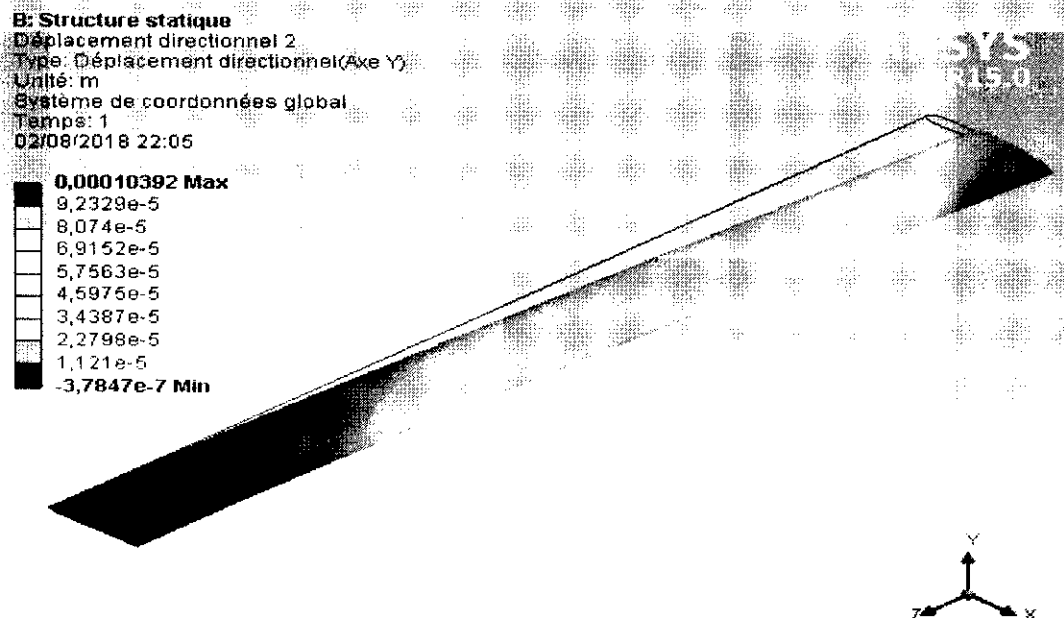
III-5-3-c-Déplacement de la pale NACA 4412



Figures III-23 : Déplacement suivant x

Tableau III-10 : valeur max de déplacement suivant X

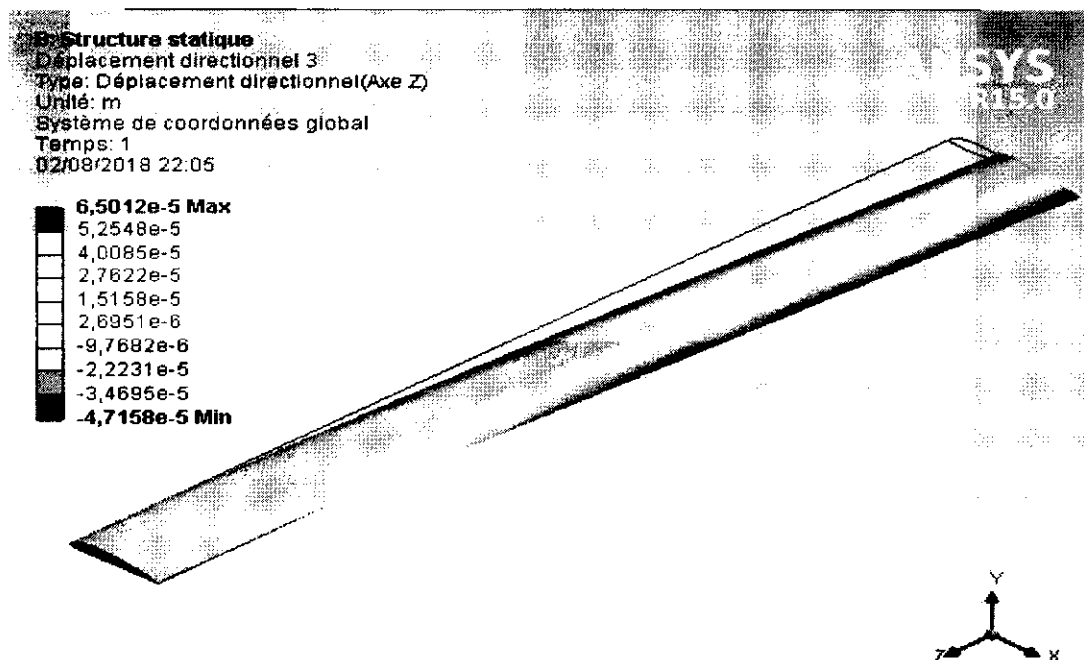
$D_{max}(m)$	0.00084212 [m]
--------------	----------------



Figures III-24: Déplacement suivant Y

Tableau III-11 : valeur max de déplacement suivant Y

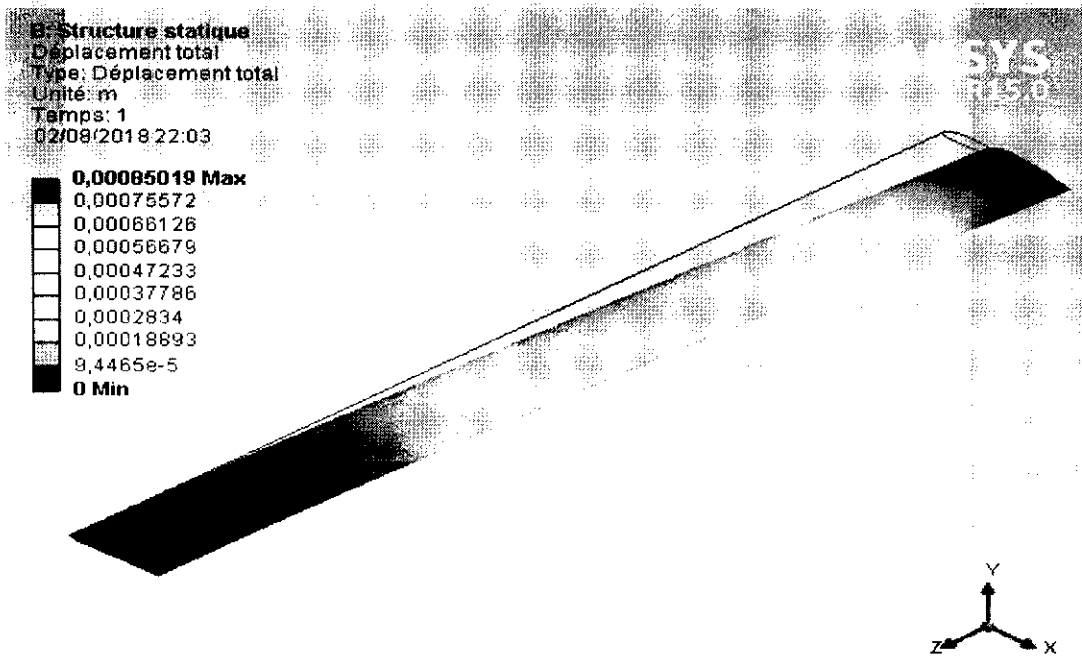
$D_{max}(m)$	0.00010392 [m]
--------------	----------------



Figures III-25 : Déplacement suivant Z

Tableau III-12 : valeur max de déplacement suivant Z

$D_{max}(m)$	$6.5012 \cdot 10^{-5}$ [m]
--------------	----------------------------



Figures III-26 : Dé placement totale

Tableau III-13 : Valeur max de déplacement totale

$D_{max}(m)$	0.00085019 [m]
--------------	----------------

### III-6-Conclusion

Dans ce chapitre, les résultats de l'effet de vitesse sur le pale NACA 4412 ont été représentés par le logiciel ANSYS, Les zones de déformation critique de la pale et les fréquences du modèle ont été identifiées à partir de la pale.

## Conclusion Générale

Dans ce mémoire, on s'est intéressé à étudier l'effet des quelques paramètres géométriques sur le comportement dynamique de pale l'éolienne avec la vitesse de vents dans la zone d'EL OUED à travers le pale NACA 4412 d'une éolienne.

Pour illustrer les phénomènes qui gèrent le comportement dynamique de la pale éolienne une modélisation est proposée via des approches analytiques et numériques, les calculs des différentes énergies et travaux virtuels de la pale ont été développés.

Pour mener notre étude par simulation numérique, on a utilisé le code numérique ANSYS, qui est l'un des codes de calcul basé sur la méthode des éléments finis. De déterminer l'effet de la vitesse de vent sous la forme de la pale après avoir transformé en pression dans les zones de collision avec la surface.

Cette étude est toujours prête à la recherche et le développement afin d'identifier les facteurs qui influent sur les performances est faible à la production d'énergie électrique par des énergies éoliennes.

## Bibliographie

[1] **K. FERKOUS**, "Etude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne," Université Mentouri constantine, 2009.

[2] **F. POITIERS** « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne-Machine asynchrone à cage autonome-Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau » Thèse de Doctorat Université de Nantes, 2003.

[3] **Nachida KASBADJI MERZOUK**, « Evaluation du gisement énergétique éolien contribution à la détermination du profil vertical de la vitesse du vent en Algérie », Thèse de doctorat, L'université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen 2006.

[4] nouvelle carte du gisement éolien en Algérie par le CDER - 2014.

[5] **LATRECHE Mohammed Tahar** « Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanant (MSAP) utilisée dans un système éolien » 24 /06 /2012. [6]: **REDJEM Radia** « Étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne »

[6] **S El Aimani**, « Modélisation des différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », thèse de doctorat, l'université des sciences et technologies de Lille (USTL).

[7] **I. Graham**, *L'énergie éolienne : les énergies en questions*, 2000.

[8] **B. Lester and R. Brown**, "Le développement de l'éolien dans le monde," France énergies éolienne, Global Wind Energy Council (GWEC),2011.

[9] **Agli and maklid**, "les paramètres aérodynamiques dans la conception de forme optimale ", Université Biskra, 2010.

[10] <http://ooxygene.alwaysdata.net/eolienne.html>

[11] **Chelirem Tayeb** « Etude Dynamique D'une Pale D'éolienne Effilée » université mentouri Constantine, 2010.

[12] **T. Goyne, Y. Plays, P. Lepourry, and J. Besse**, *Initiation à l'aéronautique*, 6ème ed.:Cepadues, Collection Fact, 2010 .