

# AERODYNAMIQUE D'UN PROFIL D'AILE DE NACA



**Etudiants :**

**Mona BOUKARI**

**Clémence DUBOIS**

**Samuel KRÖNERT**

**Vincent DELMAS**

**Emma FOURNIL**

**Thomas WATIER**

**Enseignant-responsable du projet :**

**Majd ARMALY**



### Remerciements :

Nous tenons à remercier Monsieur Majd Armaly, notre responsable de P6, qui nous aidé tout au long du projet durant ce semestre, notamment sur la bibliographie, sur l'analyse des courbes ainsi que la présentation du rapport.

Date de remise du rapport : **11/06/2022**

Référence du projet : **STPI/P6/2022 – 29**

Intitulé du projet : **Aérodynamique d'un profil d'aile de NACA**

Type de projet : **Bibliographique/ recherches et simulations/modélisation sur le logiciel XFOIL**

Objectifs du projet :

**Ce projet consiste premièrement à réaliser une étude bibliographique sur les éoliennes et le profil d'aile NACA appliqué aux pales puis à mener à bien une étude de l'écoulement de l'air autour d'une pale d'éolienne de profil NACA.**

Mots-clefs du projet :

- **Profil NACA**
- **Aérodynamisme**
- **Écoulement**
- **Xfoil**
- **Modélisation**

Si existant, n° cahier de laboratoire associé : ***non***

## TABLE DES MATIERES

1. Introduction .....	6
2. Méthodologie / Organisation du travail .....	6
3. Travail réalisé et résultats .....	7
3.1. Recherches théoriques .....	7
3.1.1. Introduction aux éoliennes .....	7
3.1.2. Vecteurs du vent sur les pales des éoliennes [17] .....	9
3.1.3. Caractéristique d'une pale [3][6][24][25][27] .....	10
3.1.4. Le nombre de Reynolds .....	11
3.1.5. Désignation des pales NACA [7][8][22][26][29][30][31] .....	12
3.1.6. Coefficients aérodynamiques .....	12
3.1.7. Géométrie des pales basée sur le nombre de Reynolds [35][39][40] .....	13
Calcul de la longueur de la corde .....	13
Calcul de la cambrure maximale .....	14
Calcul de l'épaisseur maximale (en m) .....	14
Calcul du bord d'attaque .....	14
3.2. Modélisation, analyses des courbes et résultats .....	14
3.2.1. Représentation vectorielle des forces de pression .....	14
3.2.2. Analyse des courbes [39][44][45][46][47] .....	15
4. Conclusions et perspectives .....	19
5. Bibliographie .....	20
6. Annexes .....	25
Loi de Betz [5][16][18][19][20][23] .....	25
Tip Speed Ratio [15][23] .....	26
Régulation par décrochage et par pas variable .....	27
Séparation d'écoulement et vitesse d'écoulement [28][33][34][37][38] .....	28

## 1. INTRODUCTION

Qu'est-ce qu'un profil NACA ? Dans quelles situations est-il utilisé ? Quelles sont ses caractéristiques aérodynamiques ?

Voici toutes les questions que nous nous sommes posées une fois l'attribution des sujets faite. Nous avons donc compris que le sujet concernait tant bien les éoliennes que les avions. Ce sujet est d'actualité mais aussi une opportunité de transition écologique, cette étude a donc été très intéressante et sera utile dans notre futur.

Ces profils aérodynamiques ont été développés pour des ailes d'avions par la National Advisory Committee for Aeronautics situé aux Etats-Unis, il s'agit de profils normés.

Nous avons décidé de nous focaliser principalement sur des profils NACA pour des pales d'éoliennes afin d'appliquer notre sujet à une situation concrète qu'on a quotidiennement l'habitude de rencontrer.

Il existe plusieurs types d'éoliennes, et qu'elles soient verticales ou horizontales, toutes sont caractérisées par leurs pales, présentant de nombreux profils. Il a donc fallu étudier l'aérodynamisme de la pale pour optimiser son efficacité et son utilisation ; en effet le but est que l'éolienne soit rentable énergétiquement. Les objectifs principaux de ce projet sont de mener une étude théorique puis de modéliser les pales d'éoliennes.

Nous avons tout d'abord réalisé des recherches sur le profil NACA puisqu'aucun d'entre nous ne connaissait ce sujet. Puis une fois s'être bien renseigné sur la technicité du projet nous avons réalisé une étude expérimentale sur Xfoil, un logiciel permettant de nous donner les caractéristiques de n'importe quelle pale. Nous détaillerons notre organisation ainsi que les phases d'études dans les pages suivantes.

## 2. METHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL

Afin de mener à bien ce projet, il était nécessaire de mettre en place une organisation de travail optimale. Effectivement, il a fallu que chacun se mobilise pour réaliser les tâches qui lui ont été attribuées pour atteindre les objectifs fixés. Tout au long de ce projet, nous avons adapté la répartition des tâches de manière à être le plus efficace possible.

Par conséquent, avec l'aide de notre directeur de projet Majd Armaly, nous avons divisé notre projet en trois grands axes :

- Février/Mars : Bibliographie, Recherche et Documentation sur les théories concernant l'écoulement autour des profils d'aile NACA,
- Avril/Mai : Calculs numériques sur le logiciel Xfoil afin de vérifier les éléments théoriques trouvés,
- Mai/Juin : Création du poster et Synthèse du projet, Rédaction du rapport (et Préparation à la soutenance orale).

La répartition des tâches a été remodelée tout au long du projet. Le travail de chacun est listé dans l'organigramme ci-dessous et en annexe. De plus, il ne faut pas oublier que ce projet est bien un travail de groupe au cours duquel chacun a pu exprimer ses idées et apporter son esprit critique sur chaque aspect et partie du projet.



Diagramme de la répartition des tâches au cours du projet

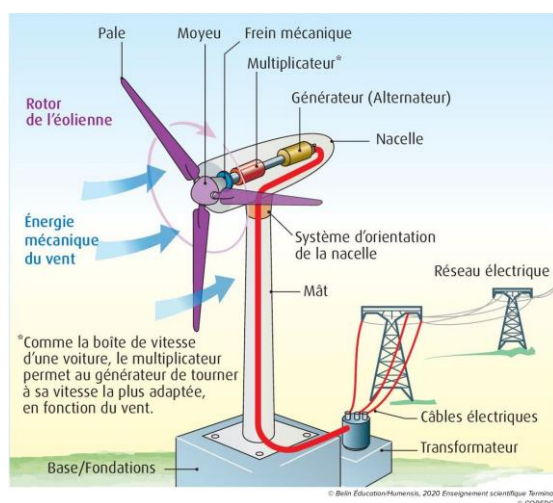
### 3. TRAVAIL REALISE ET RESULTATS

#### 3.1. Recherches théoriques

##### 3.1.1. Introduction aux éoliennes

D'après le dictionnaire Larousse, l'adjectif éolien qualifie ce qui fonctionne sous l'action du vent. Une éolienne est un système à ailes ou à pales tournantes convertissant l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre pour entraîner une machine (pompe) ou un alternateur électrique.

Le principe de fonctionnement d'une éolienne consiste à faire tourner les pales de l'hélice grâce au vent. Cette hélice entraîne ensuite un générateur qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique. Cette dernière est par la suite acheminée vers le réseau électrique.



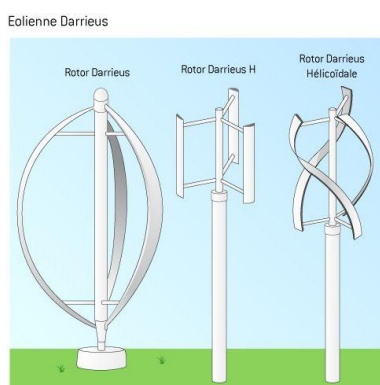
**Figure 1: Composition et fonctionnement d'une éolienne**

On distingue deux types d'éoliennes : celles à axe vertical et celles à axe horizontal.

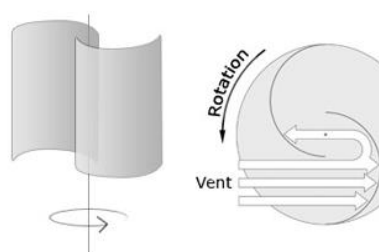
L'éolienne verticale est munie de pales tournant autour d'une tige positionnée verticalement. Elle présente de nombreux intérêts, que ce soit en matière de captation du vent ou d'encombrement. Parmi les éoliennes verticales on retrouve les éoliennes Darrius et les éoliennes Savonius. [41]

L'éolienne Darrius, inventée en 1931 par Georges Darrius a pour caractéristique des pales incurvées. Elles sont ainsi entraînées vers l'avant dès que le vent souffle avec l'effet de portance, actionnant un rotor.

Les éoliennes Savonius sont composées de 2 demi-cylindres s'entraînant entre eux lorsque le vent s'engouffre dans l'un des demi-cylindre. Les pales tournent et entraînent ainsi le rotor et le générateur produit de l'électricité.



**Figure 2:**  
**Eolienne Darrius**



**Figure 3:**  
**Photographie d'une éolienne Savonius**



Les éoliennes verticales comportent de nombreux avantages : elles sont simples à installer et elles peuvent fonctionner avec un vent relativement faible provenant de n'importe quelle direction. Les Savonius sont idéales pour les zones non venteuses et les Darrieus pour les zones venteuses, comme en bord de mer. Les éoliennes verticales sont moins bruyantes que les éoliennes à axe horizontal car celles-ci tournent moins vite. Concernant leurs inconvénients, elles produisent moins d'électricité qu'un modèle horizontal.

Les éoliennes à axe horizontal sont les plus répandues. Ces éoliennes utilisent la force de portance du vent sur les pales pour les mettre en rotation. Cette rotation permet ensuite d'actionner le générateur. [14]



*Figure 4: Eolienne à axe horizontal*

Le principal avantage de ces éoliennes est leur rendement, notamment si son système d'orientation des pales est bien positionné par rapport au vent. Elles sont également solides et ont un faible coût d'entretien. L'un des inconvénients est la pollution sonore engendrée.

### **3.1.2. Vecteurs du vent sur les pales des éoliennes [17]**

La pale d'une éolienne est soumise à deux vecteurs correspondant au vent qui s'applique sur la pale :

- le vecteur du vent qui est normal au plan de l'éolienne, c'est le vecteur du vent qui suit naturellement le sens du vent ;
- le vecteur du vent relatif à la rotation de la pale, il correspond à l'angle d'incidence de la pale

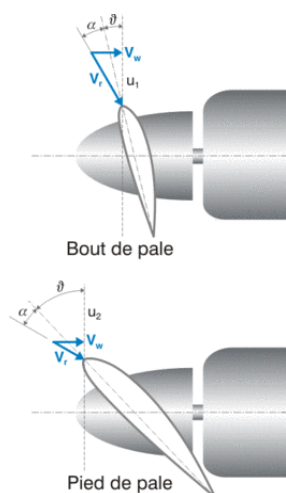


Figure 5: Ecoulement du vent à deux endroits de la pale

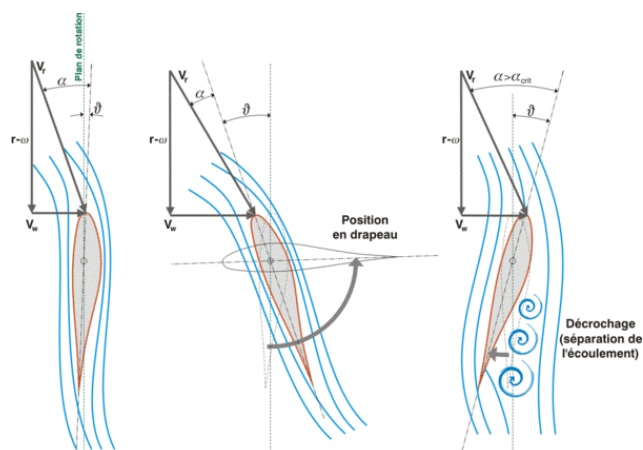


Figure 6: Ecoulement du vent en fonction de la position de la pale

La résultante de ces deux vecteurs correspond au vent qui s'applique théoriquement sur l'aile. On remarque grâce au schéma ci-dessus que cette résultante est variable tout le long de la pale. Ce vecteur sera pris en compte pour déterminer théoriquement la portance et la traînée de la pale.

### 3.1.3. Caractéristique d'une pale [3][6][24][25][27]

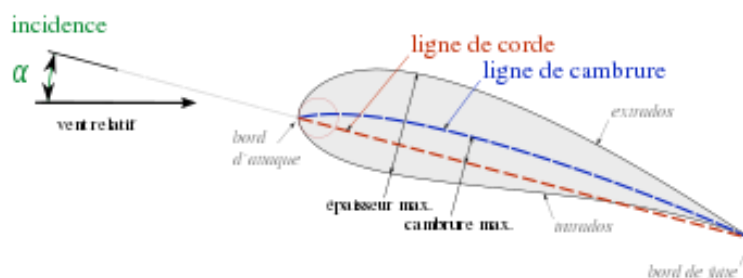


Figure 7 : Profil d'une pale

#### Bord d'attaque :

Le bord d'attaque est la partie antérieure d'un profil aérodynamique qui fait face au flux d'air relatif. Le bord d'attaque héberge aussi le point d'arrêt (encore nommé "point de stagnation"), c'est le point où l'écoulement est divisé en deux parties (une partie passant au-dessus du profil et l'autre au-dessous). Ce point d'arrêt se déplace légèrement le long du profil en fonction de l'incidence.

**Bord de fuite :**

Le bord de fuite est la partie postérieure d'un profil aérodynamique vers laquelle le flux d'air s'éloigne de l'aéronef.

Le bord de fuite est une partie caractéristique de tout profilé (exemples : aile d'avion, safran, quille ou étambot d'un navire, etc.) soumis à l'écoulement d'un fluide (air, eau, ...) de part et d'autre. Il désigne la partie arrière considérée dans le sens de l'écoulement.

**Ligne de corde :**

La ligne de corde est une ligne imaginaire joignant le bord d'attaque au bord de fuite d'un profil aérodynamique.

**Ligne de cambrure :**

La ligne de cambrure désigne le rapport  $f/c$  entre la flèche maximale  $f$  de la ligne moyenne et la corde  $c$ . Si le profil est symétrique, la cambrure est nulle.

**Flèche :**

La flèche correspond à la distance entre la ligne de corde et la ligne de cambrure.

**Extrados :**

L'extrados d'un profil porteur symétrique est la face du côté de la portance, pour une pale d'hélice c'est la surface avant (celle qui est dirigée du côté de la traction).

**Intrados :**

Face opposée à la cambrure et opposée à la portance. C'est là que se trouve la surpression. Pour une pale d'hélice, c'est la surface arrière, dirigée du côté opposé à la traction.

**Angle d'incidence :**

Angle formé entre la corde et le vent relatif.

**3.1.4. Le nombre de Reynolds**

Ce nombre adimensionnel permet de calculer la nature de l'écoulement. Si ce nombre est petit alors l'écoulement est laminaire et si celui-ci est grand on pourra dire que l'écoulement est turbulent.

$$Re = \frac{Vl}{\nu} = \frac{\rho Vl}{\mu}$$

*Équation 1 : Nombre de Reynolds*

avec

$V$  la vitesse relative de la pale par rapport à l'air (m/s)

$l$  la longueur de la corde (m)

$\nu$  la viscosité cinématique

$\rho$  la masse volumique du fluide  
 $\mu$  la viscosité dynamique du fluide

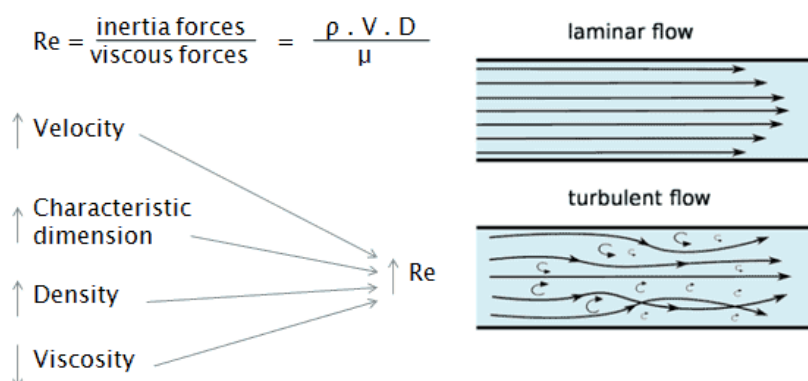


Figure 8 : Nature de l'écoulement en fonction du nombre de Reynolds

### 3.1.5. Désignation des pales NACA [7][8][22][26][29][30][31]

Les pales NACA correspondent à plusieurs profils différents, ces derniers sont caractérisés par une série de 4 chiffres ou plus. Ces chiffres ont une signification bien précise qui définissent la géométrie de la pale.

Pour la série de 4 chiffres MPXX, M correspond à la cambrure maximale en pourcentage, le P équivaut au point de cambrure maximale par rapport au bord d'attaque en dixième de la corde, enfin les 2 derniers chiffres XX décrivent l'épaisseur maximale du profil par rapport à la corde. La cambrure correspond au degré à partir duquel la pale est asymétrique.

On peut prendre pour exemple le NACA 2412 que l'on peut décrire grâce au paragraphe ci-dessus. Cette pale a une cambrure de 2%, un point de cambrure maximal par rapport au bord d'attaque est de 40% et enfin une épaisseur maximale de 12% de la longueur de la corde.

### 3.1.6. Coefficients aérodynamiques

Pour une aile complète, on définit les coefficients aérodynamiques par rapport à la surface de l'aile, il en existe plusieurs nous utiliserons  $C_l$ ,  $C_d$ ,  $C_m$  :

- $C_l$  (coefficient de portance) :  $C_l = \frac{2L}{\rho S V^2}$
- $C_d$  (coefficient de traînée induite) :  $C_d = \frac{2D}{\rho S V^2}$
- $C_m$  (coefficient de moment de tangage) :  $C_m = \frac{2M}{l \rho S V^2}$

Nous utilisons aussi la finesse d'une aile soit le rapport entre  $C_l$  et  $C_d$  :  $f = \frac{C_l}{C_d} = \frac{L}{D}$

On note aussi la pression dynamique :  $q_{\infty} = \frac{1}{2}\rho V_{\infty}^2$

Avec :

$L$  : la portance

$D$  : la traînée

$M$  : le moment de tangage de bord d'attaque

$S$  : la surface alaire

$l$  : la longueur de la corde

$V$  : la vitesse du vent

$V_{\infty}$  : la vitesse à l'infini amont

Ces derniers sont directement récupérés sur le logiciel Xfoil pour chaque profil NACA étudié.

### 3.1.7. Géométrie des pales basée sur le nombre de Reynolds [35][39][40]

En premier lieu nous avons, à l'aide de notre tuteur, trouvé un programme nommé Xfoil permettant de réaliser des simulations de l'écoulement de l'air autour de différents profils NACA. XFOIL a d'abord été développé par Mark Drela au MIT en tant qu'outil de conception pour le projet MIT Daedalus dans les années 1980. Il a été développé en collaboration avec Harold Youngren. La version actuelle est la 6.99, sortie en décembre 2013. Malgré son millésime, elle est encore largement utilisée. XFOIL est écrit en FORTRAN. XFOIL est un programme interactif pour la conception et l'analyse de profils. Compte tenu des coordonnées spécifiant la forme d'un profil aérodynamique 2D, des nombres de Reynolds, XFOIL peut calculer la répartition de la pression sur le profil aérodynamique et donc les caractéristiques de portance et de traînée. Le programme permet également la conception inverse, il fera varier une forme de profil aérodynamique pour obtenir les paramètres souhaités. Ainsi grâce à ce logiciel, nous avons pu obtenir les coefficients aérodynamiques ( $C_l$ ,  $C_d$ ,  $C_m$  ...) correspondant à chaque profil, leurs modélisations et celles de l'air circulant autour de chaque pale. Avec ces données, nous avons, par la suite, reporté toutes les valeurs dans un tableur afin de tracer différentes courbes permettant de voir l'influence des caractéristiques de la pale sur les paramètres aérodynamiques.

Tout d'abord, il est nécessaire de définir les termes que nous allons utiliser par la suite dans Xfoil et pour nos analyses. Nous avons choisi de réaliser tous les calculs avec une série de profils NACA à 4 chiffres.

#### Calcul de la longueur de la corde

Après avoir fixé le nombre de Reynolds à  $0,63 \cdot 10^6$  nous cherchons à obtenir la longueur de la corde en résolvant l'équation :

$$Re V = l$$

Équation 2

Nous en déduisons alors que  $l = 1,7\text{m}$

Ci-dessous sont indiquées les valeurs numériques prises par les différents paramètres influents sur le nombre de Reynolds.

$\rho$  masse volumique de l'air :  $\rho = 1,225 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  à  $15^{\circ}\text{C}$

$\mu$  viscosité dynamique de l'air :  $\mu = 18,5 \times 10^{-6} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$

$V$  vitesse du vent : en moyenne  $V = 20 \text{ km/h} = 5,6 \text{ m/s}$

### Calcul de la cambrure maximale

Le premier chiffre composant le profil de l'aile, souvent compris entre 0 et 8, représente la cambrure maximale en pourcentage de la corde : On peut donc déterminer la cambrure maximale à l'aide de l'expression suivante.

$$\text{Équation 3 : } \text{cambrure max} = \frac{\text{1er chiffre} * \text{longueur de corde}}{100}$$

### Calcul de l'épaisseur maximale (en m)

L'épaisseur maximale se calcule grâce à la désignation du profil NACA de l'aile. En effet les deux derniers chiffres définissent l'épaisseur maximale du profil en pourcentage de la corde. Donc nous réalisons le calcul suivant pour obtenir l'épaisseur maximale :

$$\text{Équation 4 : } \text{épaisseur max} = \frac{\text{dernier chiffre} * \text{longueur de corde}}{100}$$

### Calcul du bord d'attaque

Le bord d'attaque se calcule différemment selon les profils. Effectivement si le 2ème chiffre du profil est différent de 0 alors le bord d'attaque se calcule à l'aide de la formule ci-dessous et s'exprime en  $\text{m}^{-1}$  :

$$\text{Équation 5 : } \text{bord d'attaque} = \frac{2\text{ème chiffre} * 10}{100 * \text{cambrure max}}$$

Si le profil est de la forme 00XX, on est dans le cas d'un profil NACA symétrique et dans ce cas le bord d'attaque se calcule avec la formule suivante :

$$\text{Équation 6 : } \text{bord d'attaque} = 1,1019 * \text{épaisseur max}^2 * \text{longueur de corde}$$

## 3.2. Modélisation, analyses des courbes et résultats

### 3.2.1. Représentation vectorielle des forces de pression

Notre première analyse a été une analyse qualitative des forces de pression s'appliquant sur les différents profils NACA avec les graphiques suivants :

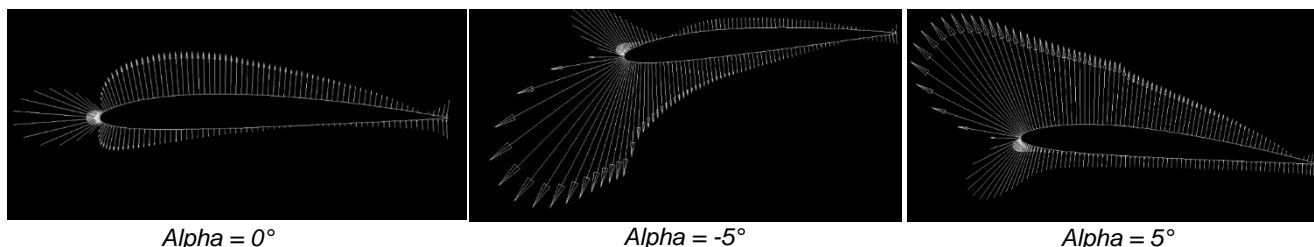


Figure 9 : Vecteurs pression sur un profil NACA 2410 avec une corde de 1,7m

On voit bien sur la figure 9 que la pression au-dessus de la pale (extrados) est supérieure à celle en dessous (intrados), ce qui explique que la pale va se déplacer vers le haut et, si elle est fixée à son extrémité, va tourner. Nous avons ensuite fait varier plusieurs

paramètres afin de nous familiariser avec l'influence des paramètres sur l'efficacité des pales NACA. Les documents correspondants sont joints en annexe (Annexe 1 à 13).

Nous avons noté par exemple que l'augmentation de la cambrure maximum ou de l'épaisseur du profil augmentait considérablement les forces de pression sur l'entièreté de la pale. Pour ce qui est de l'angle d'attaque, un fort angle d'attaque entraîne de fortes pressions sur l'extrados et particulièrement au niveau du bord d'attaque, un angle d'attaque négatif donne de plus grandes pressions sur l'intrados que sur l'extrados. Le nombre de Reynolds, lié à la taille de la pale, ne modifie pas qualitativement les forces de pression.

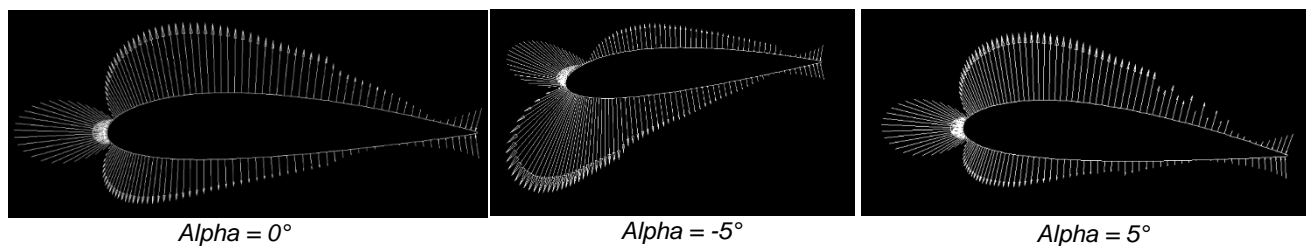


Figure 10 : Vecteurs pression sur un profil NACA 2418 avec une corde de 1,7m

### 3.2.2. Analyse des courbes [39][44][45][46][47]

Afin d'obtenir la modélisation des caractéristiques de la pale nous avons suivi un protocole en inscrivant au fur et à mesure les termes suivants dans le logiciel Xfoil:

- NACA XXXX
- OPER
- GRID
- VISC avec  $r = 0,63E6$
- ALFA x (avec x variable)

Premièrement, comme mentionné précédemment nous avons choisi de fixer la longueur de la pale à 1,7 m ; ce qui implique un nombre de Reynold fixe. En fixant l'angle d'attaque à  $0^\circ$  (désigné par alfa dans Xfoil), nous obtenons ce genre de modélisation :

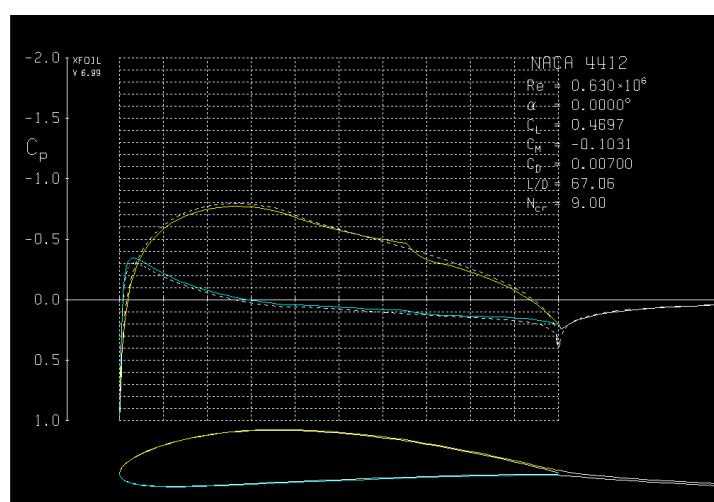


Figure 11 : Modélisation sur Xfoil

## CL en fonction d'alpha

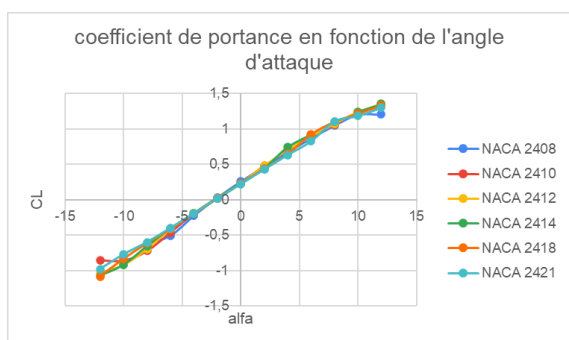


Figure 12

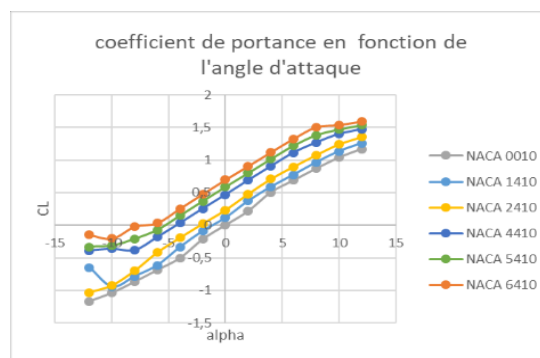


Figure 13

Le coefficient de portance (CL) dépend de l'angle d'attaque  $\alpha$  lorsque l'angle augmente, la portance augmente jusqu'à un maximum<sup>[44]</sup>.

Une fois ce maximum dépassé c'est le décrochage<sup>[45]</sup> : la portance diminue plus ou moins fortement. Nous pouvons remarquer sur la figure 13 ce léger décrochage pour le profil NACA 1410 à partir de  $12^\circ$  et  $-10^\circ$ .

On remarque sur la figure 12 qu'en termes de portance les courbes sont globalement les mêmes excepté pour les profils NACA 2408 et 2410 qui ont un angle de décrochage qui arrive plus rapidement. Ces profils sont donc moins avantageux.

On remarque que plus on augmente la cambrure max plus il y a de portance. Le profil 6410 est donc plus avantageux.

## CD en fonction d'alpha

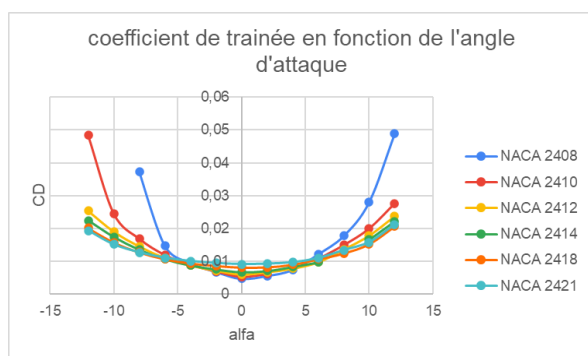


Figure 14

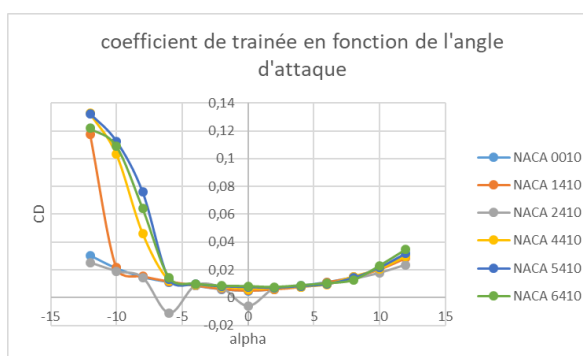


Figure 15

Le CD varie de 0,05 à 0,025 en moyenne et de manière symétrique par rapport à  $\alpha 0^\circ$ .

Il existe plusieurs types de traînée, sur les figures 14 et 15, nous nous intéressons à la variation de la traînée induite en fonction d'alpha.

Nous pouvons remarquer, sur la figure 14, que CD forme une parabole en fonction de alpha. La forme de la parabole peut s'expliquer par le fait que la traînée induite varie en fonction du carré du coefficient de portance.



Étant donné que le coefficient de portance forme une droite, on obtient donc une parabole.

### CM en fonction d'alpha

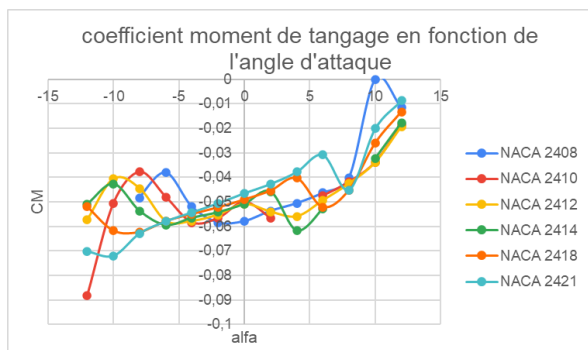


Figure 16

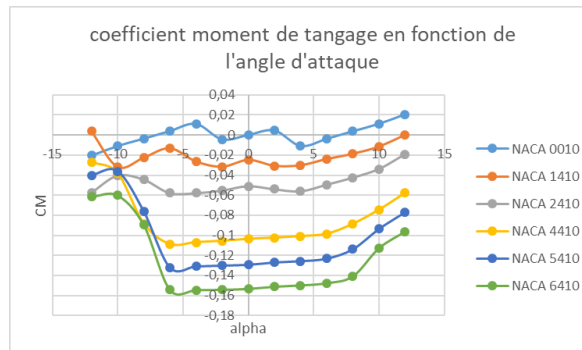


Figure 17

Nous apercevons que les courbes en figures 16 et 17 ne sont pas linéaires. Cependant, elles ont une tendance croissante, on voit donc que plus l'angle alpha augmente plus le coefficient de tangage augmente.

Mais il reste dans le négatif (-0.001 au maximum) et on voit aussi qu'il ne varie pas énormément passant de -0.09 à -0.01 soit +0.08 entre le min et le max. Nous pouvons voir que CM est une fonction d'alpha.

Lorsque que le moment de tangage est croissant, le profil est instable. Dans ce cas, nous pouvons en conclure que nos profils NACA sont instables lorsqu'alpha est négatif et stable lorsqu'il est positif.

Par exemple, s'il y a une rafale de vent, l'angle diminue et le moment devient négatif donc l'aile ne revient pas à sa position. Le profil est donc instable lorsque  $\alpha < 0$ .

S'il était stable lorsque l'angle diminue le moment deviendrait positif mettant l'aile en position de base. Et lorsqu'alpha > 0, quand l'angle augmente, le CM est négatif ce qui fait que l'aile revient en position : le profil est stable lorsqu'alpha > 0.<sup>[47]</sup>

Le profil qui se rapproche le plus du modèle théorique du profil instable est le modèle 1410.

### CL en fonction de CD : les polaires :

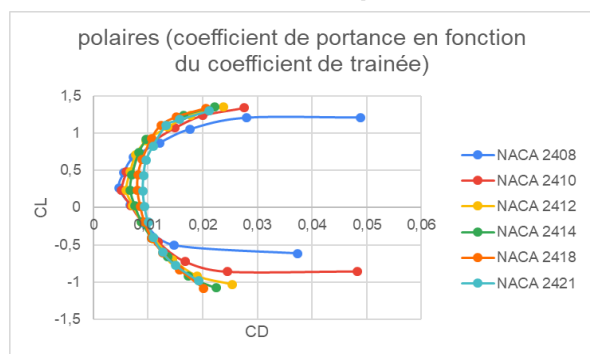


Figure 18

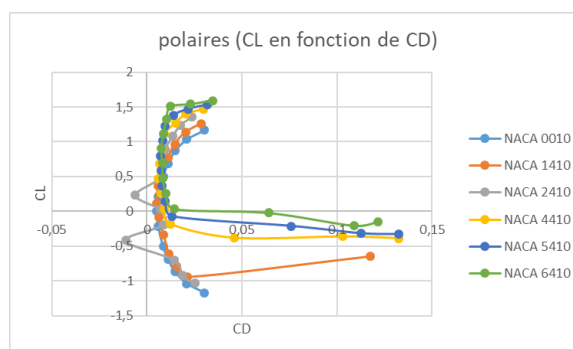


Figure 19

Sur les figures 18 et 19, lorsque  $C_D$  est entre 0,005 et 0,02 et le  $C_L$  varie grandement de -1 à 1,4 alors que lorsque  $C_D > 0,02$  le  $C_L$  est constant avec  $C_L$  constant à -1 ou 1. Nous cherchons à avoir le  $C_L$  le plus grand possible et le  $C_D$  le plus petit possible. On obtient ce rapport à  $C_L=1$  et  $C_D=0,01$ . On obtient alors un rapport  $C_L/C_D$  de 100. Lorsque l'on compare ce rapport sur le graphique, on ne trouve pas mieux.

En effet l'une des caractéristiques pour avoir une conception d'un aéronef optimal est d'avoir un rapport  $L/D$  élevé. En effet cela traduit un coefficient de traînée induite plus faible qui permet donc de consommer moins de carburant et d'avoir une meilleure performance en montée.

Lorsque l'on trace le graphique de  $C_L$  en fonction de  $C_D$  nous sommes censés retrouver une forme en U, ce qui se confirme par nos simulations effectuées sur Xfoil. En effet, la forme de cette parabole s'explique par le fait que la traînée induite varie en fonction du carré du coefficient de portance.

On constate que l'épaisseur du profil influe sur les coefficients du polynôme liant  $C_L$  et  $C_D$ , ainsi, une plus petite épaisseur donne un plus petit  $C_L$  et un plus grand  $C_D$  donc un rapport moins intéressant. Par ailleurs, la cambrure du profil tend à faire augmenter le coefficient  $C_L$  pour un même  $C_D$ , les profils à grande cambrure maximum ont donc de meilleures performances.

Le rapport portance / traînée n'est pas la seule donnée à prendre en compte pour un concepteur, en effet il faut aussi entre autres prendre en compte les performances pour différents angles d'attaque et l'angle de décrochage.

### **$C_L/C_D$ en fonction d' $\alpha$ : finesse du profil**

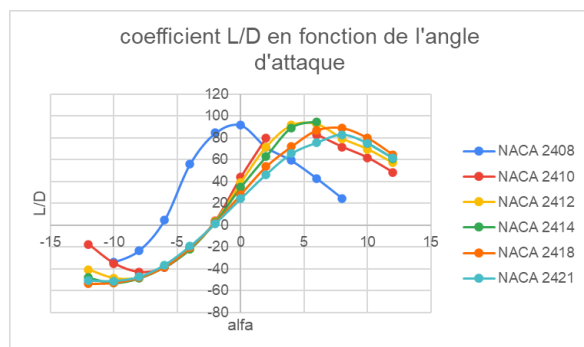


Figure 20

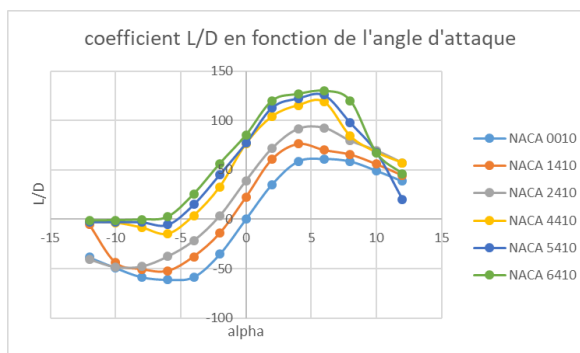


Figure 21

La courbe de finesse du profil permet d'obtenir la meilleure finesse pour la pale, c'est-à-dire le meilleur rapport des forces qui s'exercent sur celle-ci. En effet, il faut avoir un rapport  $L/D$  élevé pour avoir un  $C_L$  le plus grand possible et un  $C_D$  le plus petit possible.<sup>[46]</sup>

On cherche à obtenir le plus grand  $L/D$ . On peut voir sur la figure 20 que pour les profils que  $L/D$  est au maximum - on obtient alors  $L/D=95$  - lorsqu' $\alpha$  est compris entre  $5^\circ$  et  $10^\circ$ . Si on veut un modèle plus adapté à un angle d'attaque entre  $-5^\circ$  et  $2^\circ$  alors le profil NACA 2408 serait plus adapté. Sinon pour un modèle adapté à un angle d'attaque entre  $5^\circ$  et  $10^\circ$  d'angle d'attaque, les profils 2414 et 2412 sont ceux qui atteignent le maximum en termes de coefficient  $L/D$ . Cependant, l'épaisseur du profil influe peu sur la finesse de la pale si on garde la même cambrure.

Sur la figure 22, nous pouvons remarquer que sur la courbe que le profil NACA 6410 est le plus adapté en termes de coefficient L/D en effet il atteint un maximum de 135 à 5° d'angle d'attaque. La cambrure influe plus sur la finesse de la pale. Une grande cambrure permet une meilleure finesse et donc une meilleure efficacité de la pale.

Quand on se place dans des conditions réelles, il faut choisir le meilleur compromis entre finesse et résistance de la pale, paramètre que nous n'avons pas pris en compte dans notre étude. Ces paramètres sont en effet en contradiction, plus le profil est fin, moins il est résistant. Ainsi, on sait qu'un profil avec une grande cambrure maximale permet un meilleur rendement dans l'immédiat mais peut-être moins résistant sur la durée.

On peut ainsi déterminer grâce à nos analyses que le modèle avec une cambrure max de 64XX qu'il était le plus adapté. De plus, les modèles avec une épaisseur XX12 et XX14 étaient les plus adaptés. On peut donc en conclure que les modèles 6412 et 6414 seraient les profils les plus optimisés.

On constate tout d'abord que l'on retrouve les formes que nous attendions selon nos recherches. Ces résultats permettent de choisir le profil le plus adapté en fonction de l'emplacement de l'éolienne concernée.

#### **4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES**

Nous avons choisi ce projet puisqu'il nous a tous interpellés, premièrement par son approche différente des éoliennes et finalement par notre curiosité concernant l'écoulement, une notion encore abstraite pour nous. Les éoliennes sont aujourd'hui présentes au quotidien et par conséquent elles sont connues de tous, mais techniquement parlant, peu connaissent la complexité autour du mécanisme et du mouvement du fluide autour de la pale. Réaliser des simulations de l'écoulement autour des différents profils, nous a notamment fait apprécier le projet. Ainsi cela nous a permis de nous rendre compte de la complexité et l'existence des différents profils mais aussi de leur écoulement durant leur fonctionnement.

Finalement, nous sommes d'accord pour dire que la réalisation de ce projet a nécessité du temps et une organisation au sein du groupe. Effectivement, premièrement les recherches bibliographiques ont été chronophages et les simulations avec le logiciel Xfoil ont nécessité beaucoup de coordination entre nous ainsi qu'une gestion du temps parfaite afin de ne pas retarder le groupe. Cela a pu être compliqué pour certains d'entre nous puisque nous ne connaissions pas le logiciel, il a fallu un temps d'adaptation et de prise en main. Le bon dialogue au sein de l'équipe a été primordial pour être efficace et pour s'entraider sur des tâches difficiles. Tous ces aspects pourront nous être utiles dans le futur, nos études premièrement et ensuite lors de notre carrière.

Dans l'optique d'approfondir notre travail, certains points pourraient être plus recherchés ou même être expérimentés dans la mesure du possible. En effet, le point de frustration pour l'équipe au vu du sujet a été le manque d'application de ce dernier. Nous aurions certainement aimé pouvoir appliquer nos calculs et analyses autour des profils à une éolienne existante pour avoir des mesures en temps réel etc. Ou encore réaliser une modélisation d'un profil pour ensuite effectuer des tests d'écoulement sur la pale qu'on aurait confectionné grâce à une imprimante 3D. Tout cela dans le but d'être plus réaliste face au problème et ainsi voir chaque erreur pour l'améliorer ou le revoir complètement.

## 5. BIBLIOGRAPHIE

[1] lien internet :

<https://www.totalenergies.fr/particuliers/parlons-energie/dossiers-energie/energie-renouvelable/quels-sont-les-differents-types-d-eoliennes>

(valide à la date du 14/11/2018).

[2] lien internet :

<https://www-techniques-ingenieur-fr.ezproxy.normandie-univ.fr/base-documentaire/mecanique-th7/machines-aerodynamiques-et-compresseurs-42176210/eoliennes-bm4640/pales-bm4640v3niv10005.html>

(valide à la date du 10/01/2017).

[3] lien internet : <https://www.heliciel.com/aerodynamique-hydrodynamique/profils%20aile%20profil%20pale.htm>

(valide à la date du 21/11/2021).

[4] lien internet : <http://airfoiltools.com/airfoil/naca4digit>

(valide à la date du 01/01/2022).

[5] lien internet : <https://www.i3ea.org/articles/i3ea/pdf/2010/01/i3ea10005.pdf>

(valide à la date du 20/10/2011).

[6], figures 5 et 6 lien internet : <https://energieplus-lesite.be/theories/eolien8/aerodynamique-des-eoliennes/> (valide à la date du 04/06/2010).

[7] H. ABBOT & DOENHOFF. (1959). *Theory of wing sections*. New York.

[8] lien internet: <https://energie.mines-nancy.univ-lorraine.fr/fluides/seminTP2019.pdf>

(valide à la date du 07/02/2019).

[9] lien internet : <https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89olienne>

(valide à la date du 10/01/2017).

[10] lien internet : <https://www.wind-energy-the-facts.org/design-styles.html>

(date inconnue).

[11] lien internet : [https://eolienne.f4jr.org/systeme\\_de\\_regulation\\_et\\_de\\_protection](https://eolienne.f4jr.org/systeme_de_regulation_et_de_protection)

(valide à la date du 22/03/2022)

[12] lien internet : <https://researchhubs.com/post/engineering/wind-energy/pitch-regulated-and-stall-regulated-wind-turbine.html>

(valide à la date du 01/01/2015)

[13] lien internet : <http://xn--drmstrre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/fr/tour/wtrb/powerreg.htm>  
(valide à la date du 10/05/2003)

[14] lien internet : <https://www.youtube.com/watch?v=h3AWepgVTCU>  
(valide à la date du 07/01/2016)

[15] lien internet : <https://energieplus-lesite.be/techniques/eolien6/eoliennes/>  
(valide à la date du 12/05/2010)

[16] lien internet : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Limite\\_de\\_Betz](https://fr.wikipedia.org/wiki/Limite_de_Betz)  
(valide à la date du 02/03/2022)

[17] lien internet : [https://eolienne.f4jr.org/eolienne\\_etude\\_theorique](https://eolienne.f4jr.org/eolienne_etude_theorique)  
(valide à la date du 10/02/2022)

[18] lien internet :  
[https://fr.wikipedia.org/wiki/Limite\\_de\\_Betz#Limite\\_th%C3%A9orique\\_et\\_implications\\_pratiques\\_de\\_la\\_formule](https://fr.wikipedia.org/wiki/Limite_de_Betz#Limite_th%C3%A9orique_et_implications_pratiques_de_la_formule)  
(valide à la date du 02/03/2022)

[19] lien internet :  
<https://www-techniques-ingenieur-fr.ezproxy.normandie-univ.fr/base-documentaire/energies-th4/energies-renouvelables-42594210/physique-des-eoliennes-be8584/puissance-du-vent-be8584niv10001.html>  
(valide à la date du 30/11/2018)

[20] lien internet :  
<https://www-techniques-ingenieur-fr.ezproxy.normandie-univ.fr/base-documentaire/energies-th4/energies-renouvelables-42594210/atlas-du-potentiel-de-l-energie-eolienne-et-mesures-de-vent-be8400/potentiel-energetique-eolien-be8400niv10003.html>  
(valide à la date du 10/03/2018)

[21] lien internet :  
[https://eolienne.f4jr.org/eolienne\\_etude\\_theorique](https://eolienne.f4jr.org/eolienne_etude_theorique)  
(valide à la date du 10/02/2022)

[22] lien internet :  
<http://aerodynamique.chez.com/profil.html>  
(valide à la date du 09/11/2000)

[23] lien internet :  
[Rendement des éoliennes - Énergie Plus Le Site \(energieplus-lesite.be\)  
https://energieplus-lesite.be/theories/eolien8/rendem](https://energieplus-lesite.be/theories/eolien8/rendem)  
(valide à la date du 12/05/2010)

[24] lien internet :

[http://badkiller.alex.pagesperso-orange.fr/Presentation\\_diff\\_eoliennes.htm](http://badkiller.alex.pagesperso-orange.fr/Presentation_diff_eoliennes.htm)

date inconnue

[25] lien internet :

[rg/file/Energie/eolien/puissance\\_d-une\\_eolienne\\_MOOC\\_UVED.pdf](rg/file/Energie/eolien/puissance_d-une_eolienne_MOOC_UVED.pdf)

“MOOC Energies Renouvelables”, Université Virtuelle Environnement et Développement Durable, date inconnue

[26] lien internet :

[https://fr.wikipedia.org/wiki/Profil\\_NACA](https://fr.wikipedia.org/wiki/Profil_NACA)

(valide à la date du 16/07/2016)

[27], Figures 25, 26, 27 lien internet :

[https://energieplus-lesite.be/theories/eolien8/aerodynamique-des-eoliennes/#Le\\_reglage\\_de\\_la\\_puissance\\_calage\\_et\\_decrochage](https://energieplus-lesite.be/theories/eolien8/aerodynamique-des-eoliennes/#Le_reglage_de_la_puissance_calage_et_decrochage)

(valide à la date du 04/06/2010)

[28] lien internet :

[https://stringfixer.com/fr/Flow\\_separation](https://stringfixer.com/fr/Flow_separation)

date inconnue

[29] lien internet :

[https://fr.linkfang.org/wiki/Profil\\_NACA#Profils\\_De\\_Ligne\\_De\\_Cambrure](https://fr.linkfang.org/wiki/Profil_NACA#Profils_De_Ligne_De_Cambrure)

(valide à la date du 20/10/2021)

[30] lien internet :

[https://defr.abcdef.wiki/wiki/NACA-Profile#Sechsstellige\\_NACA\\_Serie](https://defr.abcdef.wiki/wiki/NACA-Profile#Sechsstellige_NACA_Serie)

(valide à la date du 13/07/2021)

[31] lien internet :

[http://acversailles.free.fr/documentation/06~Notices\\_Techniques/059-Profil\\_NACA\\_trace\\_des\\_profils\\_a\\_5\\_digits.pdf](http://acversailles.free.fr/documentation/06~Notices_Techniques/059-Profil_NACA_trace_des_profils_a_5_digits.pdf)

“PROFILS NACA : Tracé des profils à 5 digits”, Michel Suire, 17/03/14, consulté le 28/02/22

[32] lien internet :

<http://airfoiltools.com/airfoil/naca4digit>

(date inconnue)

[33] lien internet :

[https://fr.wikipedia.org/wiki/S%C3%A9paration\\_de\\_couche\\_limite#:~:text=La%20s%C3%A9paration%20de%20la%20couche,les%20contours%20de%20ce%20corps.](https://fr.wikipedia.org/wiki/S%C3%A9paration_de_couche_limite#:~:text=La%20s%C3%A9paration%20de%20la%20couche,les%20contours%20de%20ce%20corps.)

(valide à la date du 26/11/2021)

**[34], Figures 28 et 29** lien internet:  
<https://www.lavionnaire.fr/AerodynEcoulAir.php>  
(valide à la date du 20/05/2015)

**[35]** lien internet :  
[https://www.cder.dz/vlib/revue/pdf/v010\\_n2\\_texte\\_10.pdf](https://www.cder.dz/vlib/revue/pdf/v010_n2_texte_10.pdf)  
(valide à la date du 28/02/2022)

**[36]** lien internet :  
<http://www.msc.univ-paris-diderot.fr/~phyexp/pmwiki.php/Turbine/IETUDEDELAPHYSIQUEDUSUJET#:~:text=Le%20coefficient%20de%20portance%20de,du%20profil%20de%20la%20pale.>  
(valide à la date du 06/05/2012)

**[37]** lien internet :  
<https://www.youtube.com/watch?v=HfICmKv9SzE>  
(valide à la date du 21/09/2021)

**[38]** lien internet :  
[https://www.youtube.com/watch?v=1C7LKih7Z\\_s](https://www.youtube.com/watch?v=1C7LKih7Z_s)  
(valide à la date du 26/08/2018)

**[39]** lien internet :  
<https://heliciel.com/aerodynamique-hydrodynamique/base%20de%20donnee%20profils%20aerodynamique%20hydrodynamique.htm>  
(valide à la date du 21/11/2021)

**[40]** lien internet :  
<http://foilivier.free.fr/fr/xfoil.htm>  
(date inconnue)

**[41]** lien internet :  
<https://www.totalenergies.fr/particuliers/parlons-energie/dossiers-energie/energie-renouvelable/tout-savoir-sur-l-eolienne-verticale>  
(valide à la date du 05/12/2018)

**[42] et figure 8** lien internet:  
<https://www.thermal-engineering.org/fr/quest-ce-que-le-nombre-de-reynolds-definition/>  
(valide à la date du 02/03/2020)

**[43]** lien internet :  
[http://www.xflr5.tech/docs/Survol\\_Bases\\_Aero\\_et\\_XFLR5.pdf](http://www.xflr5.tech/docs/Survol_Bases_Aero_et_XFLR5.pdf)  
(valide à la date du 15/09/2009)

**[44]** lien internet :

[https://fr.wikipedia.org/wiki/Portance\\_\(a%C3%A9rodynamique\)#:~:text=le%20coefficient%20de%20portance%20de,portance%20puis%20atteint%20un%20maximum](https://fr.wikipedia.org/wiki/Portance_(a%C3%A9rodynamique)#:~:text=le%20coefficient%20de%20portance%20de,portance%20puis%20atteint%20un%20maximum)

(valide à la date du 20/05/2022)

**[45]** lien internet :

[https://stringfixer.com/fr/Lift-to-drag\\_ratio](https://stringfixer.com/fr/Lift-to-drag_ratio)

(date inconnue)

**[46]** lien internet :

<https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Stabilite-longitudinale-aviation.html>

(date inconnue)

**[47]** lien internet :

[http://www.xflr5.tech/docs/Survol\\_Bases\\_Aero\\_et\\_XFLR5.pdf](http://www.xflr5.tech/docs/Survol_Bases_Aero_et_XFLR5.pdf)

(valide à la date du 09/2009)

**Figure 1 :**

[https://manuelnumeriquemax.belin.education/enseignement\\_scientifique-terminale/topics/es-tle-c06-132-a\\_la-conversion-de-l-energie-mecanique-en-electricite](https://manuelnumeriquemax.belin.education/enseignement_scientifique-terminale/topics/es-tle-c06-132-a_la-conversion-de-l-energie-mecanique-en-electricite)  
2020

**Figure 2 :**

<https://eolienne.ooreka.fr/comprendre/eolienne-verticale> , date inconnue

**Figure 3 :**

<https://eolienneshop.com/products/eolienne-savonius-puissance> , 2022

**Figure 4 :**

<https://www.archiexpo.fr/prod/tozzi-green/product-62400-1822149.html> , 2022

**Figure 7 :**

<https://l-aviation.webnode.fr/l-experience/> , date inconnue



## 6. ANNEXES

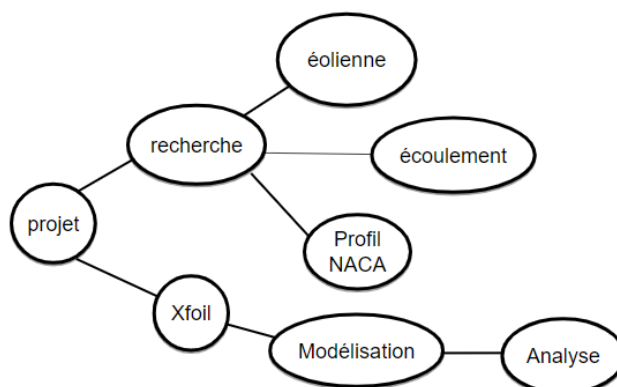


Figure 22 : Organigramme du travail réalisé

### Loi de Betz [5][16][18][19][20][23]

La loi de Betz indique la limite maximale du rendement d'une éolienne qui correspond à une valeur de 0,6. Cette limite est atteinte en théorie lorsque la vitesse du vent est divisée par 3 entre l'amont et l'aval de l'éolienne.

#### Démonstration :

En considérant que la vitesse traversant l'éolienne est la moyenne des vitesses en amont  $v_1$  et en aval  $v_2$ , on a  $v = \frac{v_1 + v_2}{2}$

La masse d'air balayée par l'éolienne correspond à  $\rho S v = \rho S \frac{v_1 + v_2}{2}$

L'énergie cinétique (puissance du vent) équivaut à  $P = \frac{1}{2} m (v_1^2 - v_2^2) = \frac{\rho}{4} S (v_1^2 - v_2^2) (v_1 + v_2)$

En comparant à un flux d'air non perturbé  $P_0 = \rho S v_1^3$  on a :  $\frac{P}{P_0} = \frac{1}{2} \left(1 - \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^2\right) \left(1 + \left(\frac{v_2}{v_1}\right)\right)$

En traçant le graphe  $\frac{P}{P_0}$  en fonction de  $\frac{v_2}{v_1}$  on atteint la valeur maximale de  $\frac{16}{27}$  en  $\frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{3}$

Ainsi la puissance d'une éolienne correspond au produit entre le coefficient de puissance ( $C_p$ ) et la puissance du vent. Le coefficient de Betz correspond au  $C_p$  théorique maximum qui pourrait être atteint avec une éolienne comportant un nombre de pales infini.

Cette limite existe car 2 phénomènes sont opposés. Le premier phénomène est que plus l'éolienne freine le vent plus elle récupère de l'énergie ( $v_1^2 - v_2^2$  dans la démonstration). Le second phénomène est que plus le débit de l'éolienne est faible, moins l'éolienne récupère de l'énergie. Cependant, le ralentissement réduit le débit ( $v_1 + v_2$  dans démonstration).

Cette valeur est dans la réalité loin d'être atteinte. En effet, la loi de Betz nous donne la puissance maximale récupérable et non la puissance maximale utile.

Pour obtenir la puissance utile, il y a d'autres pertes à prendre en compte comme les pertes de conversions qui nous donne l'énergie utilisable et enfin le seuil machine qui nous donne l'énergie utile. Ainsi l'énergie disponible subit ce qu'on appelle des pertes en cascade.

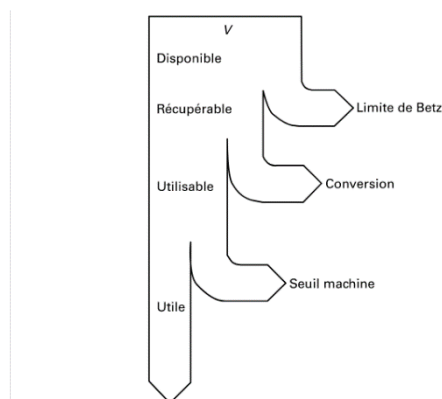


Figure 23: Schéma des pertes d'énergie de l'éolienne

### Tip Speed Ratio <sup>[15][23]</sup>

Le rapport pointe-vitesse ( $\lambda$ ), aussi appelé Tip Speed Ratio, est le rapport entre la vitesse tangentielle de la pointe d'une pale et la vitesse réelle du vent. Le rapport pointe-vitesse est lié à l'efficacité, l'optimum variant avec la conception de la lame.

$$\lambda = \frac{u}{V} = \frac{\omega R}{V} = 2n\pi \frac{R}{V}$$

Équation 5 : Tip Speed Ratio

avec :

- $u$  la vitesse en bout de pale
- $V$  la vitesse du vent en amont en mètres par seconde
- $R$  le rayon du rotor en mètres
- $n$  le nombre de tours par minute du rotor
- la vitesse de rotation du rotor en radians par seconde

Comme son nom l'indique, le tip speed ratio peut se définir simplement par un rapport entre le vent arrivant et celui sortant de la pale; c'est donc un rapport compris entre 0 et 10. Entre 0 et 3 l'éolienne est dite lente et au-dessus de 3 l'éolienne est qualifiée de rapide.

A cause des différentes pertes, principalement dues au rapport pointe-vitesse, le rendement idéal n'est jamais atteint.

La théorie confirmée par la pratique montre que les pertes sont minimisées pour un TSR donné. En d'autres termes, pour chaque vitesse de vent, il existe une vitesse de rotation qui maximise le rendement aérodynamique de l'éolienne, c'est-à-dire la quantité d'énergie du vent transférée au rotor.

Si l'éolienne tourne plus lentement pour une vitesse de vent donnée, on aura un couple aérodynamique important pour atteindre une même puissance et donc une forte déviation du fluide par les pales. Cela engendre une mise en rotation plus importante du sillage et donc des pertes plus importantes. En conclusion, plus l'éolienne tourne vite, moins les pertes par mise en rotation sont importantes.

Si on considère un profil d'une pale d'éolienne, la force aérodynamique se décompose en une force de portance, mais aussi de traînée qui s'oppose dans la direction de rotation de l'éolienne (du moins pour les éoliennes dont le principe de fonctionnement est basé sur la portance). L'effet négatif sur le rendement aérodynamique est d'autant plus important que l'éolienne tourne vite. Sur base des deux premiers termes de pertes (pertes de sillage et de traînée de profil), on voit apparaître un premier optimum à une vitesse relative de bout d'aile entre 6 et 8.

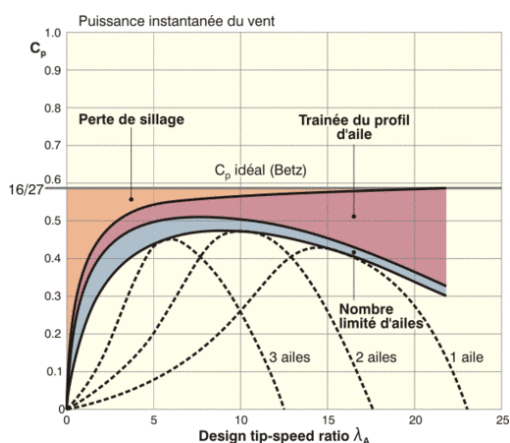


Figure 24: Coefficient de puissance en fonction du Tip Speed Ratio

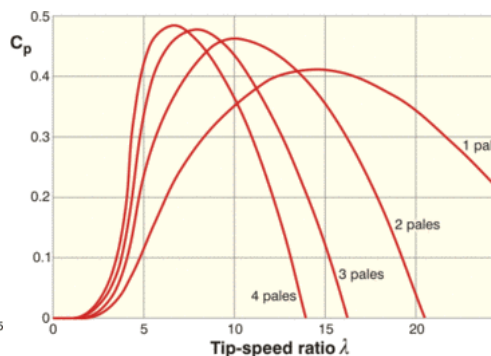


Figure 25: Coefficient de puissance en fonction du Tip Speed ratio

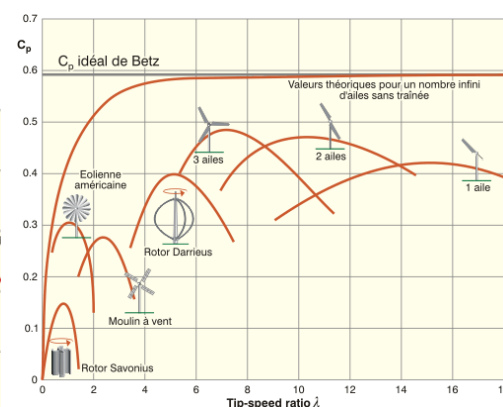


Figure 26: Evolution du coefficient de puissance pour différentes éoliennes

En observant les figures 25, 26 et 27 ci-dessus, on peut déduire que plus le nombre de pales est important, plus le Tip Speed Ratio est faible.

### Régulation par décrochage et par pas variable

La régulation par décrochage, aussi appelée pas fixe ou régulation à angle fixe se caractérise par le maintien d'une vitesse constante du rotor, même lorsque la vitesse du vent augmente. Les pales de l'éolienne sont fixes par rapport au moyeu du rotor et leur géométrie est conçue pour qu'elles subissent des décrochages. Ces raisons font qu'il est impossible pour les pales de prendre de la vitesse quand celle du vent augmente.

On peut lister de nombreux avantages tels que la fiabilité du système et son coût faible. Cependant, on observe des pertes d'efficacité notamment au démarrage et lors de vents puissants. [11][12][13]

Ce système de régulation par pas variable (pitch regulation) est aussi nommé système de régulation aérodynamique actif car il consiste à faire varier l'angle des pales en utilisant des vérins hydrauliques. Un système de contrôle fait varier cet angle en fonction de la vitesse du vent ; cette variation agit ainsi sur la portance de la pale. La régulation à pas variable a pour avantage de protéger l'éolienne lors de vents violents. Cependant, ce système est plus complexe que le précédent et nécessite d'être entretenu régulièrement. [11][12]

## Séparation d'écoulement et vitesse d'écoulement [28][33][34][37][38]

La séparation d'écoulement (aussi appelée séparation de couche limite) correspond à la séparation des différentes couches limite le long de la pale. On a d'abord la couche limite laminaire puis une zone de transition pour arriver sur la couche limite turbulente. Enfin dans certains cas, on retrouve une troisième couche après la couche turbulente : c'est la couche limite décollée illustrée dans la figure 28 ci-dessous.

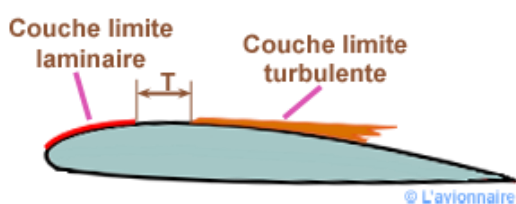


Figure 27: Différentes couches limites

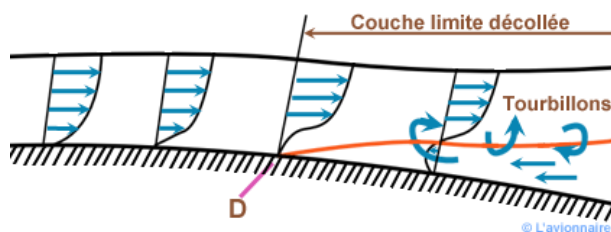


Figure 28: Illustration de la couche limite décollée

Les couches limites observées sur la figure 27 sont principalement liées aux forces de frottements de la paroi. Ce phénomène est irréversible et consomme de l'énergie (chaleur). Par conséquent, on constate une différence de pression dans les différentes couches.

Parfois la pression en sortie de la pale est supérieure à la pression initiale (avant le passage de la pale). C'est le cas des forces d'incidences grâce auxquelles on obtient la couche limite décollée. Dans cette couche, on observe une inversion des vitesses. Sur le schéma ci-dessus (figure 28), on remarque qu'à partir du point D il y a des flux d'air qui viennent du bord de fuite de la pale vers son bord d'attaque (dans le sens inverse de l'écoulement de l'air). Cette couche limite est instable et entraîne des tourbillons.

On considère l'écoulement d'un fluide sur la partie supérieure d'une aile. Ce dernier suit la forme de l'aile. Divisons cette aile en deux morceaux : la partie avant et la partie arrière de l'aile. Sur la partie avant, les lignes d'écoulement convergent, donc la vitesse d'écoulement augmente de même que l'écoulement. Sur la deuxième moitié, les lignes d'écoulement divergent, donc la vitesse d'écoulement diminue.

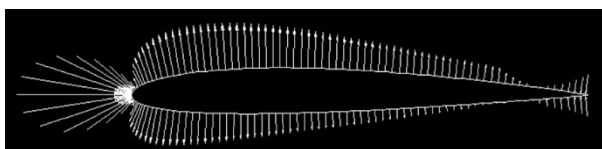
La vitesse augmente le long de la partie frontale, atteint une vitesse maximale puis diminue pour revenir à la vitesse initiale.

Concernant la pression, on peut déduire en utilisant l'équation de Bernoulli  $\frac{1}{2}v + P = cte$  que sur la partie avant de l'aile  $\frac{dP}{dx} < 0$  (avec x l'axe horizontal et y l'axe vertical) et que sur la partie arrière de l'aile  $\frac{dP}{dy} > 0$ . Autrement dit, la pression diminue sur la partie frontale et atteint sa valeur minimale. Dans cette zone de l'aile le gradient de pression est négatif et favorable car il augmente la vitesse d'écoulement.

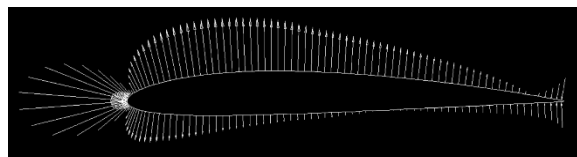
Sur la deuxième partie de l'aile, la pression augmente et atteint de nouveau la pression initiale. Dans cette zone, le gradient de pression est positif et dit défavorable car il réduit la vitesse d'écoulement.

On peut alors observer les différents profils nous permettant de définir une zone de turbulence où l'écoulement est détaché de la surface de l'aile. Cela s'explique par le fait qu'en ce point D,  $\frac{dv}{dy} = 0$ .

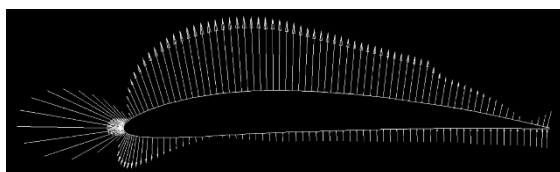
### Graphiques avec $Re = 0,63E6$ et $\alpha = 0$



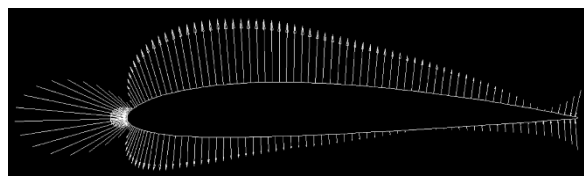
*Annexe 1 : NACA 1410*



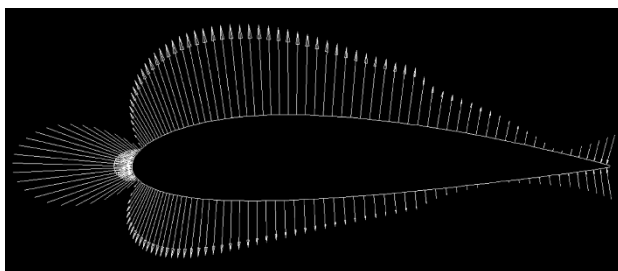
*Annexe 2 : NACA 2410*



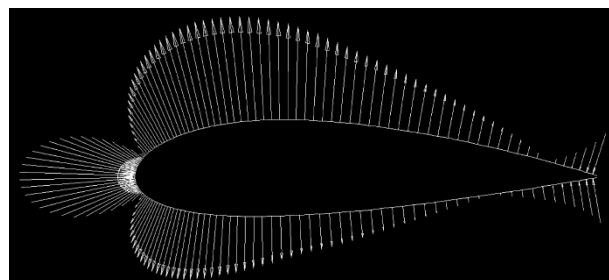
*Annexe 3 : NACA 4410*



*Annexe 4 : NACA 2412*

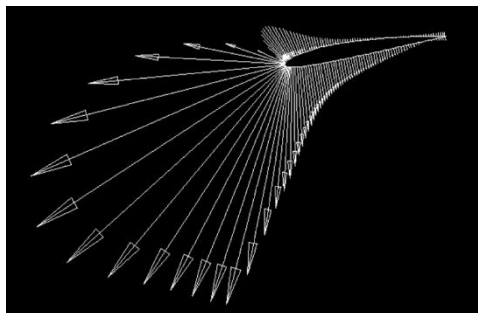


*Annexe 5 : NACA 2418*

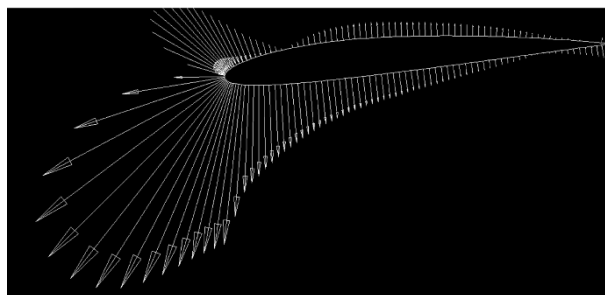


*Annexe 6 : NACA 2421*

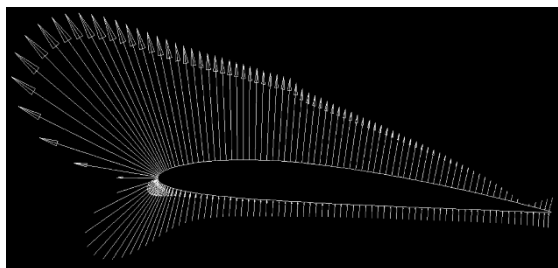
## Graphiques avec $Re = 0,63E6$ pour un profil NACA 2410



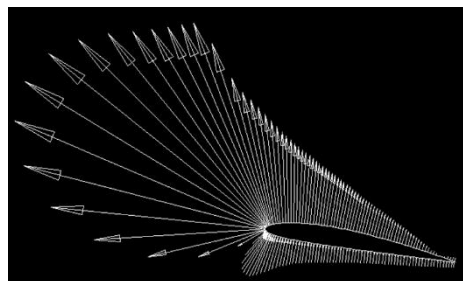
*Annexe 7 :  $\alpha = -10^\circ$*



*Annexe 8 :  $\alpha = -5^\circ$*

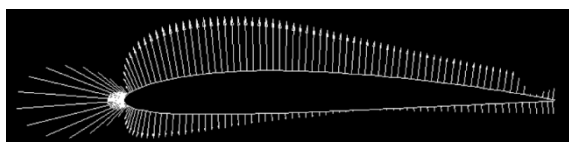


*Annexe 9 :  $\alpha = 5^\circ$*

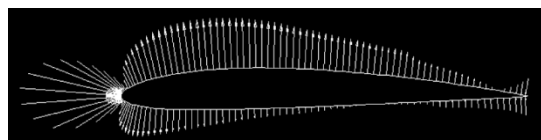


*Annexe 10 :  $\alpha = 10^\circ$*

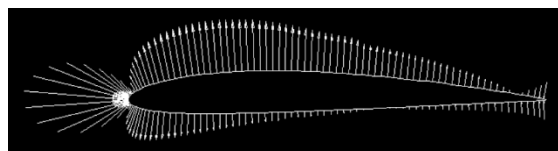
## Graphiques avec $\alpha = 0$ pour un profil NACA 2410



*Annexe 11 :  $Re = 1.85E5$*

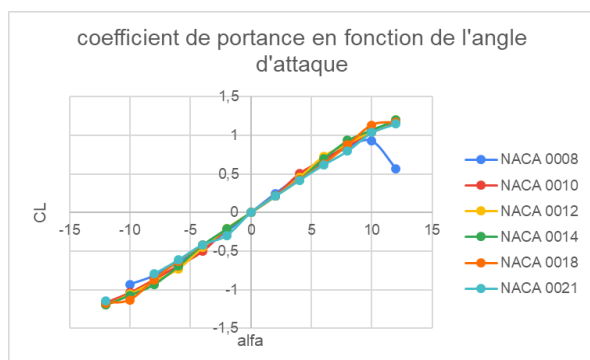


*Annexe 12 :  $Re = 1.11E6$*

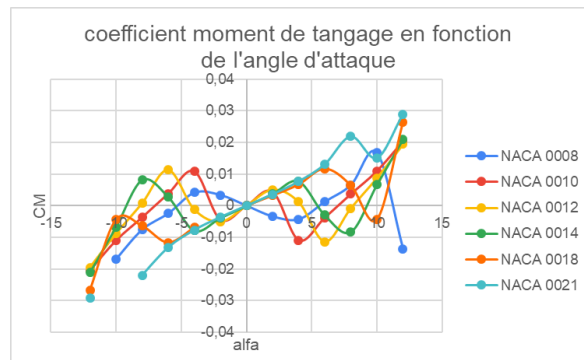


*Annexe 13 :  $Re = 3.71E6$*

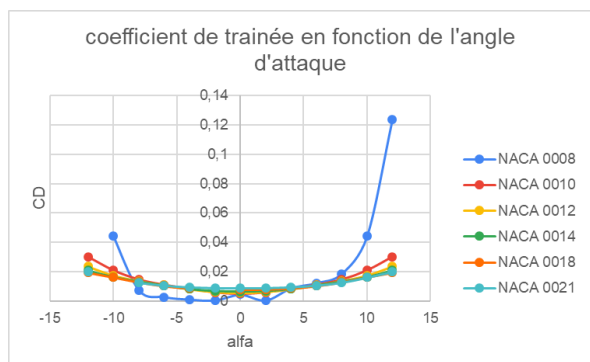
## Courbes 00XX



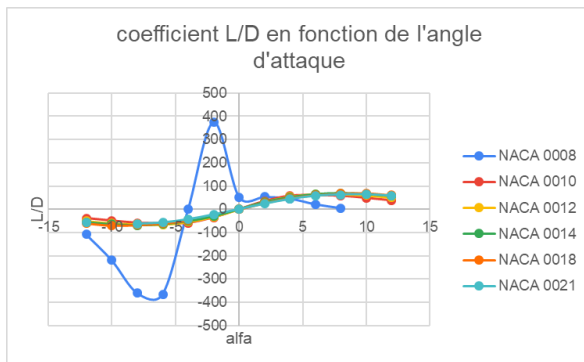
Annexe 14



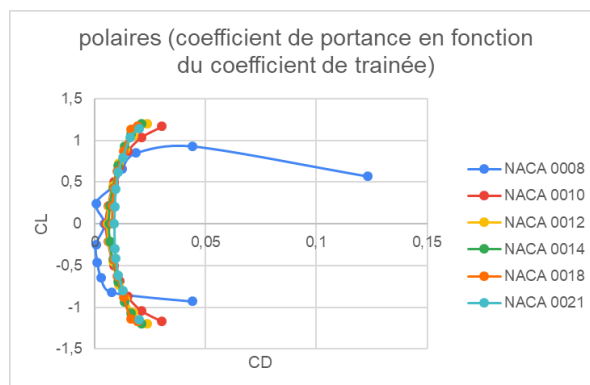
Annexe 15



Annexe 16

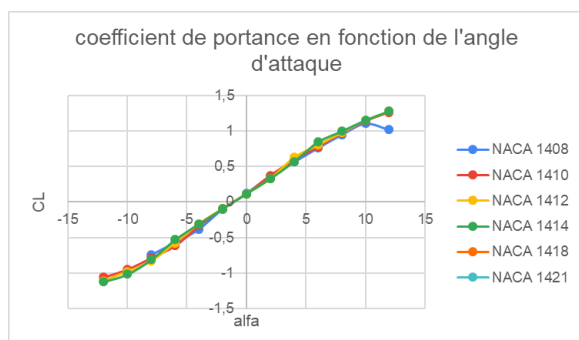


Annexe 17

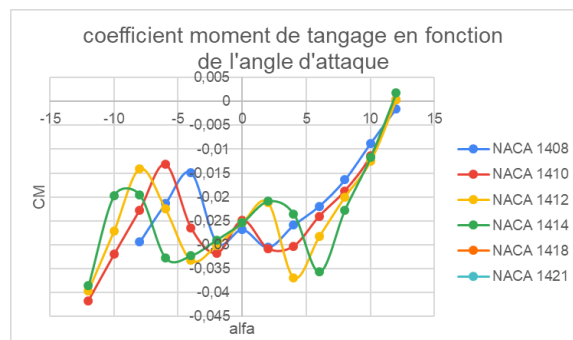


Annexe 18

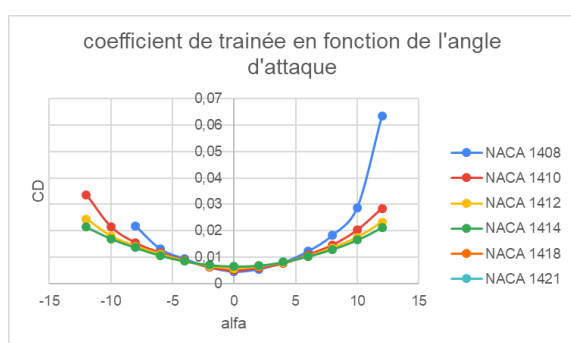
## Courbes 14XX



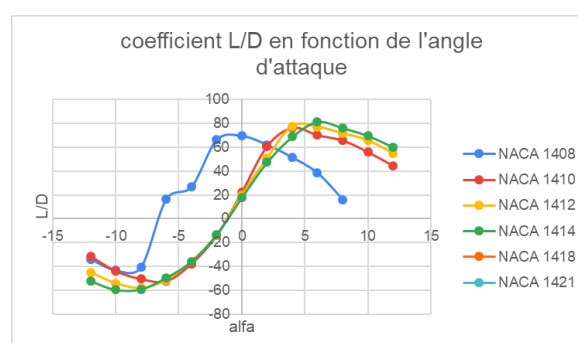
Annexe 19



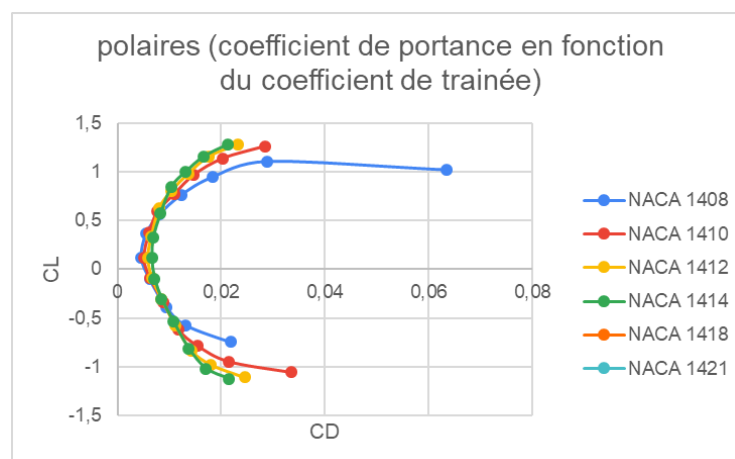
Annexe 20



Annexe 21



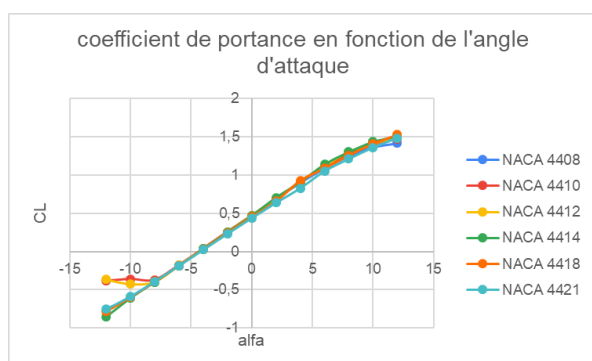
Annexe 22



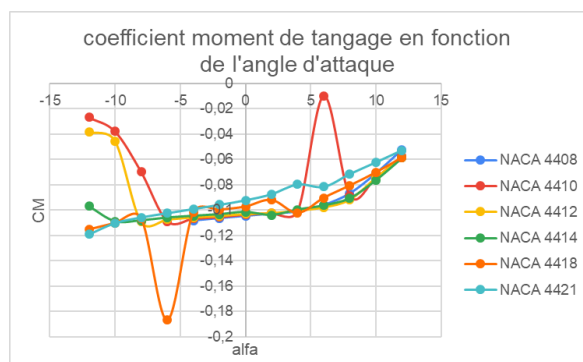
Annexe 23



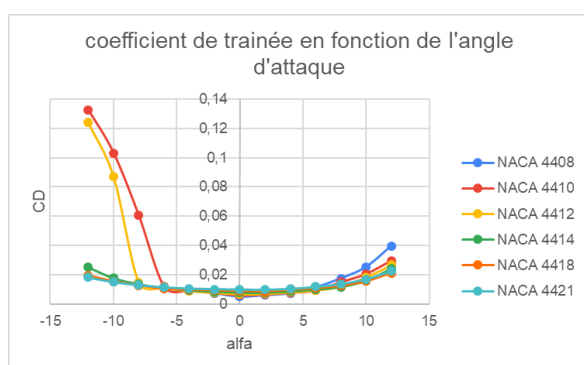
## Courbes 44XX



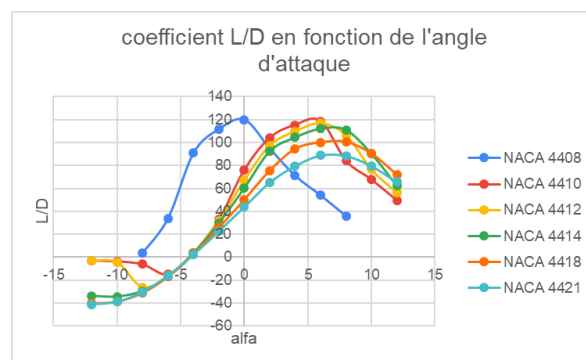
Annexe 24



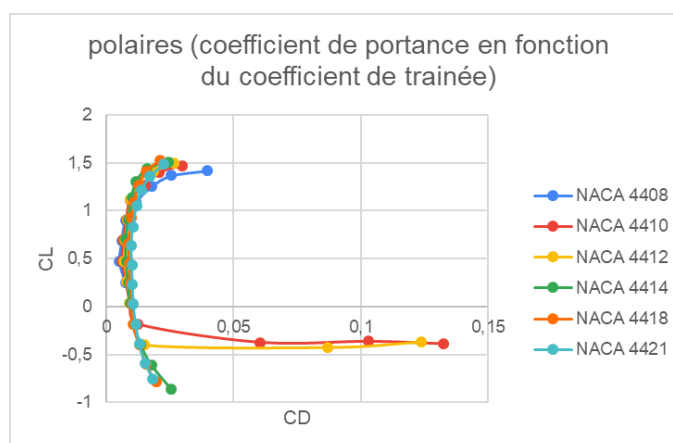
Annexe 25



Annexe 26

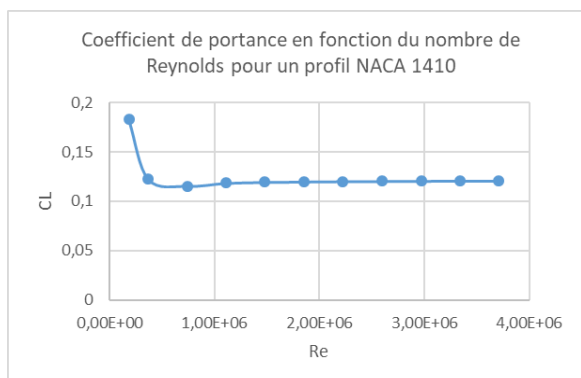


Annexe 27

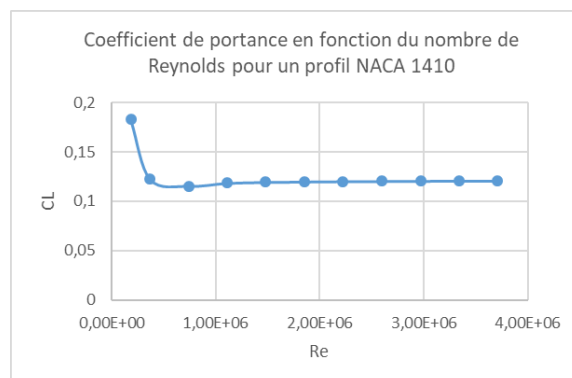


Annexe 28

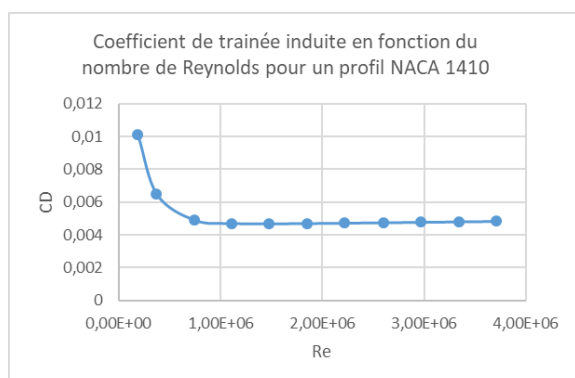
## Courbes 1410



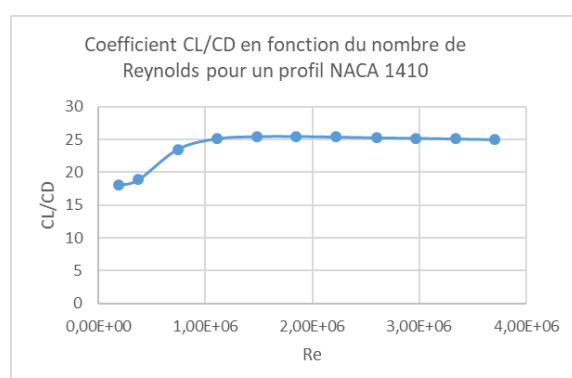
*Annexe 29*



*Annexe 30*



*Annexe 31*



*Annexe 32*