



---

# Les Eoliennes Offshores

---

LICENCE RENFORCÉE DE MATHÉMATIQUES  
ELÉANORE PATOULY



Tuteur : GALUSINSKI Cédric  
UFR Sciences et Techniques  
Année 2023-2024

## Remerciements

*Je remercie M. Cédric GALUSINSKI, mon tuteur, qui m'a accompagné durant ces deux années de recherche, pour sa disponibilité et sa patience. Il a pris le temps de m'expliquer certaines notions dont je n'avais pas connaissance, comme les logiciels de visualisation 3D. Un grand merci à lui.*

*Je souhaite aussi remercier le Parc de Saint-Nazaire avec qui j'ai pu entrer en contact, et qui a répondu à mes questions. Je n'ai pas eu la possibilité d'y aller malgré leur invitation.*

## Table des matières

<b>1</b>	<b>Préambule</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Calcul du champ de vitesse</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>Les profils NACA</b>	<b>6</b>
3.1	Modélisation de profils NACA00XX . . . . .	6
3.2	Création d'un maillage . . . . .	8
<b>4</b>	<b>Paramétrage de l'aile</b>	<b>8</b>
<b>5</b>	<b>Visualisation 3D</b>	<b>9</b>
<b>6</b>	<b>Calcul de forces et de puissance</b>	<b>10</b>
6.1	Force de portance . . . . .	10
6.2	Force de traînée . . . . .	11
6.3	Puissance d'une éolienne . . . . .	11
<b>7</b>	<b>Conclusion</b>	<b>12</b>
<b>8</b>	<b>Résumés</b>	<b>13</b>
8.1	Résumé en français . . . . .	13
8.2	Summary in english . . . . .	13
<b>9</b>	<b>Références bibliographiques</b>	<b>14</b>
<b>A</b>	<b>Annexes</b>	<b>15</b>

## 1 Préambule

Aujourd’hui, la production électrique française repose sur plus de 60 % de nucléaire. La France essaie donc de trouver d’autres alternatives en faisant le choix de diversifier ses sources d’approvisionnement afin de réduire la dépendance énergétique du pays. La crise sanitaire a montré qu’il était essentiel de pouvoir disposer de sources de production d’électricité indépendantes ne nécessitant pas une présence humaine en continue et de ne pas reposer majoritairement sur une seule et unique technologie de production.

Une éolienne est un équipement permettant de produire de l’électricité grâce à un dispositif d’hélices. L’énergie issue des éoliennes est appelée « énergie verte » car elle est produite à partir d’une source d’énergie renouvelable, ici le vent. Elle convertit l’énergie cinétique issue du vent en énergie mécanique. La France possède le deuxième gisement éolien européen après la Grande Bretagne.

L’année dernière mon étude s’est portée principalement sur le parc en mer de Saint-Nazaire, il est le premier parc offshore de France. Contrairement aux éoliennes onshores, les éoliennes offshore bénéficient de vents plus forts et constants car elles sont éloignées de tout ce qui pourrait freiner le vent. Celles-ci permettent une grande capacité de production. Il y a deux types d’éoliennes offshore :

- Les éoliennes fixes (Figure 1)
- Les éoliennes flottantes (Figure 2)

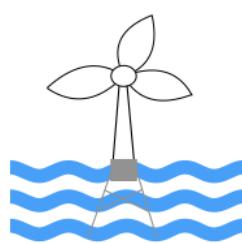


FIGURE 1 –  
Eolienne offshore  
fixe

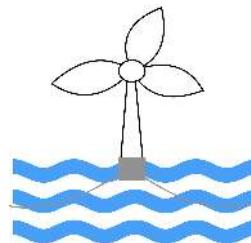


FIGURE 2 –  
Eolienne offshore  
flottant

Le rendement d’une éolienne offshore est jusqu’à deux fois supérieur à celui d’une éolienne terrestre.

Toutefois afin d’améliorer sa production d’énergie, certains paramètres sont à prendre en compte, comme la forme de la pale qui influe directement sur sa performance. [Forme

des pales, 2013] nous montre les différentes formes de pales, ainsi que l'influence de la forme sur la force de portance, qui est la force d'entraînement de l'éolienne. Différentes forces s'appliquent sur les pales d'une éolienne. Ces forces peuvent être décomposées de manière à avoir une composante tangentielle qui représente la portance et une composante perpendiculaire au plan de rotation (comme sur la Figure 3) qui représente la force de trainée.

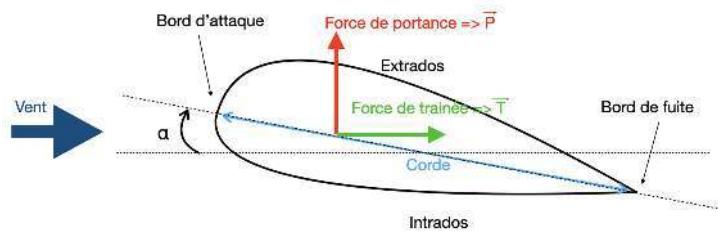


FIGURE 3 – Pale d'éolienne

La portance induit une force dans le sens de rotation, c'est pour cela que l'on dit que les éoliennes sont basées sur la portance, l'objectif étant d'accroître la portance tout en minimisant la traînée.

Il est nécessaire de modéliser les pales des éoliennes pour pouvoir agir sur les paramètres destinés à modifier la forme de celles-ci et avoir un profil ayant des performances aérodynamiques maximales, c'est l'optimisation des formes. Pour se faire, des tests sont nécessaires.

L'objectif de mon travail a été de modéliser entièrement une pale d'éolienne et de calculer les forces qui s'appliquent sur celle-ci ainsi que la puissance produite, pour comprendre l'influence de la forme des profils sur la performance et ainsi de permettre à l'éolienne de fonctionner de manière optimale (produire l'énergie maximale).

## 2 Calcul du champ de vitesse

En mécanique des fluides, le champ de vitesse correspond à la cartographie des vitesses des fluides en des points spécifiques du domaine de l'écoulement. Dans notre cas, le vent arrive en amont de la pale à vitesse constante et va venir la percuter. Comme on peut le voir sur la Figure 3 le vent arrive avec un angle d'incidence  $\alpha$ , on peut donc calculer le

champ de vitesse dans le référentiel de la pale.

Si on choisit un vent ayant une vitesse de 20 m/s et un angle incident de 15°, on a donc un vent qui aura pour composantes :

$$V_{vent} = \begin{pmatrix} v \times \cos \alpha \\ v \times \sin \alpha \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 20 \times \cos 15 \\ 20 \times \sin 15 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 19,3 \\ 5,17 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Ces valeurs représentent la vitesse du vent en amont de la pale.

Cela permet de raisonner sur l'écoulement d'une pale fixe à partir du champ de vitesse connu en amont de l'aile. Ce travail basé sur l'écoulement est très lourd en temps de calcul sachant qu'il s'agit d'une simulation 3D. Une approche simplifiée en 2D pourrait être envisagée.

Pour connaître la vitesse du vent apparent, il faut ajouter la vitesse du vent à la vitesse de la pale. La vitesse de la pale a été calculée sur un fichier jupyter notebook que vous trouverez en annexe, suivant la formule ci-dessous :

$$v_{pale} = \begin{pmatrix} 0 \\ r \times \omega \times \sin \omega t \\ r \times \omega \times \cos \omega t \end{pmatrix}$$

avec  $r = \sqrt{(longueur - de - la - pale)^2 + (longueur - de - corde)^2}$  soit  $r = \sqrt{10^2 + (1.7)^2} = 10,14$  mètres,  $\omega$  la vitesse angulaire de la pale en radians par seconde et  $t$  le temps en secondes. En choisissant  $\omega = 5$  radians par seconde, et  $t = 1$  secondes, on a la vitesse de la pale qui aura pour composantes :

$$v_{pale} = \begin{pmatrix} 0 \\ -48,6 \\ 14,4 \end{pmatrix}$$

La pale aura alors une vitesse de 51 m/s.

A l'aide de ces 2 vitesses, le calcul du vent apparent peut être réalisé. Ce calcul a été effectué sur un fichier jupyter notebook qui est disponible en annexe. Ce qui nous permet d'obtenir le graphe du vent apparent ci-dessous. Ce vecteur vitesse peut être modifié pour définir la forme de la pale proche de l'optimale pour les paramètres choisis, en trouvant l'angle adéquat du vent apparent par rapport à la pale. On pourrait alors dessiner différentes formes de pales "quasi optimales" selon ces paramètres.

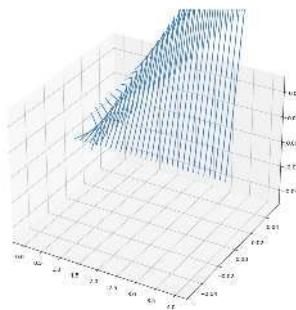


FIGURE 4 – Graphé d'un champ de vitesses

### 3 Les profils NACA

Les différents profils de pales d'éoliennes sont basés sur des profils NACA. Les deux grandes familles sont les profils NACA à quatre et cinq chiffres, appelé NACA MPXX et NACA LPQXX, avec

- M : définit la cambrure maximale
- P : est le point de cambrure maximale par rapport au bord d'attaque
- Q : indique si le profil est à cambrure simple (0) ou double (1)
- XX : donnent l'épaisseur maximale du profil

Tous ces paramètres sont donnés en pourcentage de la corde comme nous l'explique [Profils NACA, séries]. Pour cette étude j'ai fais le choix d'un profil symétrique, comme sur la Figure ci-dessous, noté donc NACA00XX.

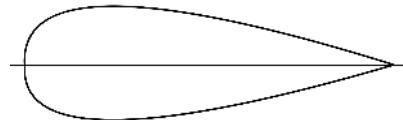


FIGURE 5 – Profil biconvexe symétrique

#### 3.1 Modélisation de profils NACA00XX

Dans le cas des profils symétriques, l'expression utilisée pour les décrire est :

$$y = \frac{T}{0.2} (0.2969\sqrt{x} - 0.1260x - 0.3516x^2 + 0.2843x^3 - 0.1015x^4) \quad (1)$$

Issu du PDF [Naca Symétrique], où T est l'épaisseur relative maximale du profil.

Cette formule est une interpolation d'un profil NACA.

On peut aussi calculer le rayon de courbure du bord d'attaque  $r = 1.1019T^2$ .

Cette modélisation nous permet d'agir sur un grand nombre de paramètres tel que la longueur de la corde, l'épaisseur, etc.

Le code ci-dessous nous montre donc la définition d'une fonction basée sur l'équation (1).

```
def naca_00TT(x,T):
    return T*(0.2969*x**0.5-0.1260*x-0.3516*x**2+0.2843*x**3-0.1015*x**4)/0.2
```

FIGURE 6 – Définition de la fonction NACA00XX

Pour les modéliser, j'ai choisi d'utiliser python pour coder les modèles dans un document jupyter notebook pour faciliter la lecture des différentes étapes de la modélisation numérique. J'ai décidé de mettre 100 points sur chaque partie supérieure (extrados) et inférieure (intrados) de chaque profil, parce que cela permet de bien définir la forme de la pale sans que l'exécution du code soit trop lourde. Mon objectif est d'obtenir une visualisation de pale d'éolienne en 3D avec le logiciel de visualisation Visit.

Pour mon visuel final j'ai choisi de tracer 40 profils d'une pale avec une longueur de corde (voir Figure 3) de 1.7 mètres pour la plus grande. Sachant qu'il y a donc 200 points par profils, la modélisation de la pale va comporter 8000 points.

Pour mes modélisations sur jupyter notebook j'ai fait le choix de n'afficher que 5 profils comme sur le graphe ci dessous pour avoir un visuel représentatif et clair.

*Les codes pour l'obtention de ce graphe sont en annexe du rapport.*

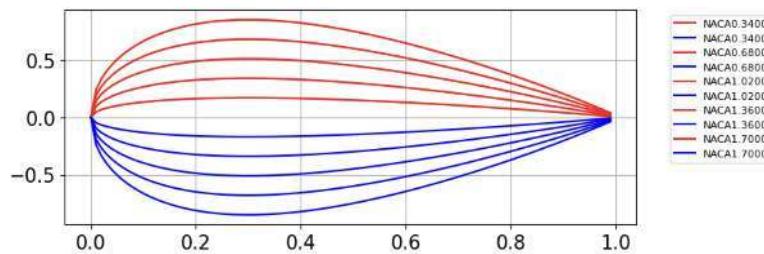


FIGURE 7 – Graphe de 5 profils NACA symétriques

On peut donc voir 5 NACA construits par symétrie avec des épaisseurs qui varient, le paramètre influant cela, est T proportionnel à la demi-épaisseur.

Même si la légende nous indique 10 NACA, on voit qu'il y a 2 légendes identiques à chaque

fois (exemple : NACA.0034), soit le bleu représentant l'intrados et le rouge l'extrados de chaque profil.

### 3.2 Crédit d'un maillage

Pour pouvoir visualiser la pale sur un logiciel de visualisation 3D, il faut maintenant créer un maillage entre les profils. Pour cela il est nécessaire d'écrire un code (que vous trouverez en annexe) qui permet de former des quadrillatères reliant 4 points, comme sur la Figure ci-après.

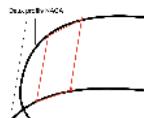


FIGURE 8 – Liaison des points

On a donc relié tous les points et construit une connectivité entre tous les points par un maillage de surface à l'aide de quadrillatères. Une fois l'ensemble des points de l'aile construit, un export au format '.vtk' permet de visualiser la géométrie de la pale.

## 4 Paramétrage de l'aile

On a donc maintenant relié tous les profils grâce au maillage de surface pour construire une aile d'éolienne. Cette pale est pour le moment droite, mais en réalité une pale d'éolienne est vrillée. En effet, la vitesse relative augmente le long de la pale, on aura donc une vitesse plus grande à son extrémité qu'à la partie située près du rotor. Donc, pour maintenir un angle d'attaque constant, il est nécessaire de vriller la pale. Ainsi la vitesse sera identique tout au long de celle-ci, le même principe est appliqué aux pales du rotor principal d'un hélicoptère. Pour vriller la pale, on applique une matrice de rotation  $R$  à chaque point, tel que :

$$R = \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{pmatrix}$$

C'est une matrice de rotation d'angle  $\beta$  (que je choisis) autour de l'axe 'y'. Après avoir appliqué cette matrice de rotation il faut incrémenter l'angle  $\beta$  (qui est l'angle 'a' dans le code en annexe) de  $\frac{\pi}{2}$ , on obtient donc une pale de 10 mètres vrillée.

Un autre paramètre à prendre en compte est que toutes les pales sont affinées. Cet affinement variable selon la longueur 'y' permet de diminuer les nuisances sonores mais

aussi de limiter les contraintes, car une surface plus grande engendrerait un plus grand nombre de contraintes.

De plus, le paramétrage proposé permet de faire de nouveaux calculs pour une pale au profil modifié. Tous les paramètres suivants peuvent être ajuster pour obtenir une meilleure puissance produite :

- La vitesse du vent
- L'angle d'incidence du vent
- La vitesse angulaire
- La longueur de la pale
- La longueur de corde
- Le pourcentage d'affinement le long de la pale
- L'épaisseur maximale du profil
- L'angle de vrillage
- L'interpolation du profil NACA

## 5 Visualisation 3D

Comme nous l'explique bien ce site [Visit, GITHUB], d'où l'on peut télécharger le logiciel, Visit est un outil évolutif et interactif de modélisation et d'analyse.



FIGURE 9 – Modélisation d'une pale non vrillée

La Figure ci-dessus est une image de ma modélisation obtenue sur le logiciel après l'exploitation de mes codes, en annexe. Cette pale est non vrillée et mesure 10 mètres avec une longueur de corde de 1,7 mètres pour l'extrémité de pâle la plus large.

Toutes ces valeurs sont mes choix, issues de test que j'ai pu réaliser et d'informations issues d'études déjà effectuées, elles définissent de nombreux degrés de liberté, elles peuvent être modifiées suivant le résultat escompté.

Pour obtenir une modélisation réaliste il faut maintenant vriller la pale, comme nous le montre les images, ci-dessous, extraites du logiciel Visit.

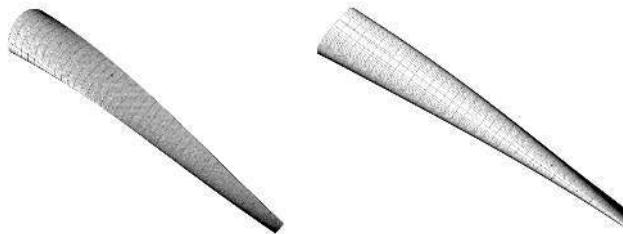


FIGURE 10 – Modélisation d'une pale vrillée

## 6 Calcul de forces et de puissance

Comme je l'ai énoncé dans le préambule et le montre la Figure 3 plusieurs forces s'appliquent sur les pales d'une éolienne.

### 6.1 Force de portance

La force de portance est une force perpendiculaire au déplacement du fluide, dans ce cas présent ce fluide est le vent. Cette force est créée par une surpression au niveau de l'intrados (Figure 3) et par l'aspiration dans la zone de dépression formée sur le dessus du profil destiné à cet effet.

La force de portance peut être calculée grâce à la formule :

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho_{air} \cdot v_{air}^2 \cdot S \cdot C_z \quad (2)$$

Avec  $\rho_{air}$  la masse volumique de l'air ( $1,225 \text{ kg/m}^3$ ),  $v_{air}$  la vitesse du vent en m/s,  $S$  la surface projetée de la pale en  $\text{m}^2$  et  $C_z$  le coefficient de portance, propre à chaque profil de pale.

Pour calculer la surface balayée il faut appliquer la formule

$$S = (\text{longueur} - \text{de} - \text{corde} - \text{moyenne}) \times (\text{longueur} - \text{de} - \text{la} - \text{pale})$$

J'ai choisi une pale de 10 mètres ce qui correspond au "rayon" de l'éolienne et une longueur de corde maximale de 1,7 mètres, on a donc une longueur de corde minimale de 0,5. La longueur de corde moyenne est donc de 1,1 mètres.

Soit  $S = 1,1 \times 10 = 11 \text{ mètres}$ . Donc la surface projetée de la pale est de 11 mètres.

Sachant que j'ai choisi de prendre un vent apparent de 20 m/s (ce qui correspond à 72 km/h) et un angle incident  $\alpha = 14^\circ$  (voir la Figure 3), on a donc  $C_z = 0,51$  comme cela est calculé sur [Coefficients] pour plusieurs valeurs de vitesse de vent et d'angle d'incidence.

On peut alors donner une approximation de la force de portance  $P$  avec la formule de

l'équation (2) :

$$P = \frac{1}{2} \times 1,225 \times 20^2 \times 11 \times 0,51 = 1.374,45N$$

On obtient une force de portance de 1.374,45 N.

## 6.2 Force de traînée

La force de traînée correspond à la résistance de l'air. C'est une force qui agit sur la pale dans la même direction que le vent, elle doit être la plus faible possible. Elle est calculée de la façon suivante :

$$T = \frac{1}{2} \cdot \rho_{air} \cdot v_{air}^2 \cdot S \cdot C_x \quad (3)$$

avec  $C_x$  le coefficient de traînée ayant pour valeur 0,18, du fait des paramètres choisis auparavant.

En appliquant cette formule on a donc

$$T = \frac{1}{2} \times 1,225 \times 20^2 \times 11 \times 0,18 = 485,1N$$

Avec tous les paramètres choisis, on obtient une force de traînée de 485,1 N ce qui est assez élevé. Mais c'est cohérent car j'ai fait de nombreuses hypothèses en négligeant notamment l'écoulement.

## 6.3 Puissance d'une éolienne

Lorsqu'on modélise une éolienne l'objectif principal est d'optimiser la puissance produite par celle-ci. Pour calculer la puissance maximale récupérable, il faut appliquer la théorie de BETZ qui nous dit qu'une éolienne récupérera au maximum 59% de la puissance de l'air. Ce chiffre ne prend pas en compte les pertes d'énergie occasionnées lors de la conversion de l'énergie mécanique du vent en énergie électrique. On a donc :

$$P = 0,59 \times \frac{1}{2} \times \rho_{air} \times S \times v_{air}^3 \quad (4)$$

Cette formule de BETZ et les forces, calculées précédemment, sont bien expliquées sur [Forces et Puissance].

On a donc :  $P = 0,59 \times \frac{1}{2} \times 1,225 \times 11 \times 20^3 = 31.801N$

On a donc une puissance maximale théorique de 31.801 W (= 31 kW) ce qui est cohérent avec la taille de la pale, au vu des informations que j'ai pu trouver.

## 7 Conclusion

Même si l'éolien est pour le moment une source intermittente de production, elle peut devenir une source fiable si on arrive à travailler sur l'optimisation de la forme des pales. La plus grande éolienne du monde située en Chine a d'ailleurs prouver cela en battant le record du monde de production d'électricité en produisant 384,1 MWh en seulement 24 heures alors qu'un typhon s'abattait en même temps sur la Chine. En cas de catastrophes naturelles la plupart des turbines cessent de fonctionner, mais cette éolienne a pu ajuster ses pales en temps réel lorsque le vent a atteint des vitesses élevées. Mais une optimisation est également nécessaire pour les vents plus faibles, cette fois-ci en modifiant les turbines pour avoir un moteur plus grand et ainsi atteindre la puissance maximale qu'une éolienne peut produire de manière continue.

Pour autant il ne faut pas perdre de vue le coût important nécessaire à la production des ces calculs de modélisation, principalement sur des simulation d'écoulement en 3D où une approche simplifiée peut être envisagée. Pour ma part, j'ai du adapter le nombre de points contenus sur les profils ainsi que la taille de ma pale pour ne pas avoir un code trop lourd à exécuter.

Chaque paramètre est un degré de liberté à prendre en compte, que l'on peut donc modifier selon la modélisation souhaitée et obtenir des formes optimisées permettant donc de faire des nouveaux calculs et obtenir la meilleure puissance produite. Dans mon étude, il y a 11 degrés de liberté, listés dans la section 4, qui peuvent être adaptés pour une aile au profil modifié. Cette optimisation est vraiment importante car elle permet d'obtenir les forces de portance et de traînée optimales pour une meilleure performance. Cette dépendance est clairement visible au niveau des équations (2) et (3) avec, notamment, le paramètre  $S$  qui dépend du rayon en bout de pale (le plus petit rayon). Le plus important, tout de même, est d'obtenir la meilleure puissance produite car c'est elle qui est représentative du rendement et de l'électricité produite par l'éolienne, avec une dépendance de la forme du profil visible sur l'équation 4.

Pour conclure, ces tests ont permis de montrer l'influence des profils sur la performance au regard des forces appliquées et de la puissance produite.

Je trouve que cette étude donne de l'espoir concernant les sources intermittentes de production, qui peuvent devenir fiables au même titre que le nucléaire et ainsi mieux équilibrer la production d'énergie entre différentes sources dont certaines sont des « énergie verte ». Cette optimisation de la forme de la pale donne des perspectives envisageables pour augmenter le rendement des éoliennes offshores.

## 8 Résumés

### 8.1 Résumé en français

Aujourd’hui, le mix énergétique reposant sur le solaire et l’éolien représente un faible pourcentage de la production électrique française comparativement au nucléaire.

C’est pourquoi la performance de chaque éolienne offshore doit être optimale pour en maximiser la production. Au travers ce rapport j’ai voulu démontré en quoi la forme de la pale a un impact considérable sur la puissance produite par l’éolienne.

Ainsi j’ai choisi de modéliser des profils du type NACA00XX qui sont symétriques. Cette paramétrisation m’a permis un grand nombre de degré de liberté.

Par le biais du logiciel Visit j’ai pu obtenir une visualisation afin de voir entièrement la pale dans l’espace et d’ajuster les paramètres choisis précédemment.

Enfin il est nécessaire de calculer les forces de portance et de traînée induites par cette pale pour prouver ou non son efficacité.

### 8.2 Summary in english

Today, the energy mix relying on solar and wind represents a small percentage of French electricity production compared to nuclear.

This is why the performance of each offshore wind turbine must be optimal to maximize its production. In this report, I wanted to demonstrate how the shape of the blade has a considerable impact on the power produced by the wind turbine.

Therefore, I chose to model NACA00XX-type profiles, which are symmetrical. This parameterization provided me with a large number of degrees of freedom.

Using the software Visit, I was able to obtain a visualization to fully see the blade in space and adjust the previously chosen parameters. Finally, it is necessary to calculate the lift and drag forces induced by this blade to prove its efficiency or not.

## 9 Références bibliographiques

[Forme des pales,2013] Laurent SENEZ, 28 octobre 2013, *La forme des pâles*

[Profils NACA,séries] Stanford University, *The NACA airfoil series*

[Naca Symétrique] C.SARRAF, H.DJERIDI, J-Y.BILLARD, Institut de Recherche de l'Ecole navale, *Effets de l'épaisseur d'un profil NACA symétrique sur les performances et les caractéristiques de la couche limite turbulente*

[Visit, GITHUB] Logiciel de modélisation et d'interaction VISIT

[Coefficients] PDF des coefficients de trainée et de portance.

[Forces et Puissance] *Etude théorique d'une éolienne, Energie fournie par le vent*

[Parc de Saint-Nazaire] F.LE TUAL, *Parc éolien en mer de Saint-Nazaire*

## A Annexes

```

def v_pale ( r, vitesse_angulaire,t):
    vpale = array([0*r, r*vitesse_angulaire * sin(vitesse_angulaire*t), r*vitesse_angulaire* cos(vitesse_angulaire*t)])
    return vpale
x=1.7 #largeur de la pale exemple
z=10 #longueur de la pale exemple
r=sqrt(x**2 + z**2)
vitesse_angulaire =5 # faire varier
t=1
#faire varier

resultat = v_pale(r,vitesse_angulaire,t)
print("vpale=", resultat)
print(r)

vpale= [ 0.          -48.63410193  14.38659549]
10.143470806385752

```

FIGURE 11 – Code pour le calcul de la vitesse de la pale

```

#calcul du vent apparent
vent = (vent_x,vent_y,vent_z)
vent=array(vent)*1
rr=linspace(0,4,30)
vitesse_angulaire=5
vpv_pale=(r,vitesse_angulaire,0)*pi/4
vp=[0,0,0]
vp[0]=vent[0]
vp[1]=vent[1]
vp[2]=vent[2]
ax = plt.figure(figsize=(10,10)).add_subplot(projection='3d')
ax.view_init(10,-30)
ax.set_xlabel('X axis')
ax.set_ylabel('Y axis')
ax.set_zlabel('Z axis')
x, y, z = rr,linspace(min(vp[1]),max(vp[1]),30),linspace(min(vp[2]),max(vp[2]),30)
vp0,vp
quiver(x, y, z, vp[0],vp[1], vp[2])
x = rr
y = zeros_like(rr)
z = zeros_like(rr) # remove *100 and the arrow heads will reappear.
vp0vp[0,1]
dx = vp[0]
dy = vp[1]
dz = vp[2]
fig = plt.figure(figsize=(10,10))
ax = fig.add_subplot(projection='3d')
ax.quiver(x, y, z, dx, dy, dz)
#ax.set_ylim(0,10)

```

FIGURE 12 – Code pour le graphe et le calcul du vent apparent

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import math
import copy
"""matplotlib widget"""
import ipywidgets as widgets
#%matplotlib inline
fs=15
plt.rcParams['xtick', 'labelsize']=fs
plt.rcParams['ytick', 'labelsize']=fs

A=np.array([[0.3**0.5,0.3,0.3**2,0.3**3,0.3**4],
            [0.5**0.3**-0.5,1,2*0.3,3*0.3**2,4*0.3**3],
            [1,1,1,1,1],
            [0.5,1,2,3,4],
            [0.1**0.5,0.1,0.1**2,0.1**3,0.1**4]])
B=np.array([0.1,0,0.0021/2,-0.234,0.0078])
np.linalg.solve(A,B)

array([-1.01600029,  4.06808007, -8.62300818,  8.83597717, -3.26399877])

def naca_00xx(x,T):
    return T*(0.2969*x**0.5-0.1260*x-0.3516*x**2+0.2843*x**3-0.1015*x**4)/0.2

```

FIGURE 13 – Définition de la fonction NACA00XX

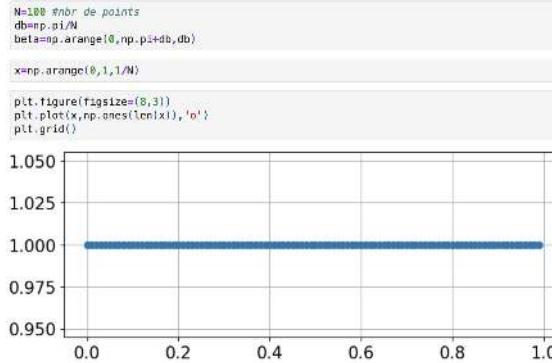


FIGURE 14 – Suite définition de la fonction NACA00XX

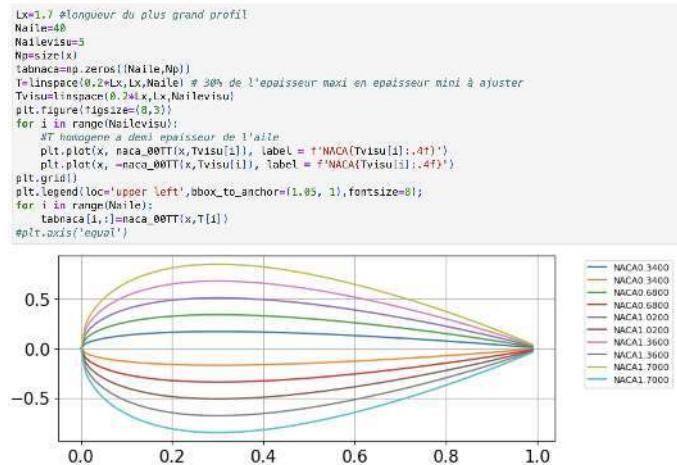


FIGURE 15 – Graphe de 5 NACA00XX symétrique

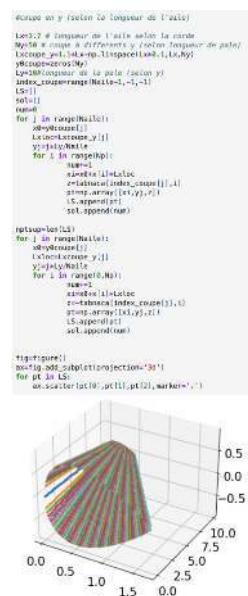


FIGURE 16 – Code et graphe pour la pale non vrillée

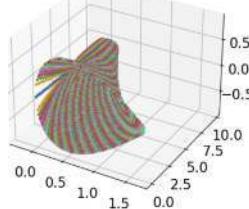


FIGURE 17 – Code et graphe 3D de la pale vrillée

```

Lquad=[]
for j in range(Naile-1):
    for i in range(Np-1):
        fi=i+j*Np
        quad=[fi,fi+1,fi+Np+1,fi+Np]
        Lquad.append(quad)

for j in range(Naile-1):
    for i in range(0,Np-1):
        fi=i+j*(Np-0)+nptsup
        quad=[fi,fi+1,fi+Np+1,fi+Np]
        Lquad.append(quad)

```

FIGURE 18 – Code pour la création du maillage

```

def imprimsolquad_vtk(nom,LS,LT,sol):
    nddlb=len(LS)
    ntb=len(LT)
    with open(nom, "w") as f:
        f.write("# vtk DataFile Version 3.0\n")
        f.write("# Exemple UNSTRUCTURED_GRID\n")
        f.write("ASCII\n")
        f.write("DATASET UNSTRUCTURED_GRID\n")
        f.write("POINTS "+str(nddlb)+" FLOAT\n")
        for k in range(nddlb):#ndl
            valeurs = "%12.6f %12.6f %12.6f\n" % (LS[k][0], LS[k][1], LS[k][2])
            f.write(valeurs)
        valeurs = "%8d %8d\n" % (ntb, 5*ntb)
        f.write("CELLS "+valeurs)
        for tr in range(ntb):#nt
            valeurs = "%8d %8d %8d %8d\n" % (4,LT[tr][0],LT[tr][1],LT[tr][2],LT[tr][3])
            f.write(valeurs)
        f.write("CELL_TYPES "+str(ntb)+"\n")
        type_tris="9 "
        for k in range(ntb):#nt
            f.write(type_tris)
        f.write("\nPOINT_DATA "+str(nddlb)+"\n")
        f.write("SCALARS solu float\n")
        f.write("LOOKUP_TABLE default\n")
        for k in range(nddlb):#ndl
            valeurs = "%12.6f\n" % (sol[k])
            f.write(valeurs)
    return None
imprimsolquad_vtk("aile.vtk",LS,Lquad,sol)

```

FIGURE 19 – convertir en fichier '.vtk'