

Projet Méthode Eléments Finis

Etude d'une Eolienne
verticale de type Darrieus H

Tuteur encadrant :
Mathieu RENOUF

GAUZE - Agathe

LAZAAR - Nassim

PEREIRA DE PINHO - Mathis

Abstract

Ce rapport de projet se concentre sur l'analyse tridimensionnelle en contraintes d'une éolienne verticale de type Darrieus H dans le but de déterminer ses caractéristiques de dimensionnement en élasticité. L'approche adoptée repose sur l'utilisation de la méthode des éléments finis à travers le logiciel Castem, dans le cadre des hypothèses des petites perturbations. L'étude a été menée en effectuant une série de cas statiques, en variant la direction et le sens du vent tout en maintenant la géométrie de l'éolienne constante. Cette méthodologie permet une compréhension approfondie des contraintes subies par l'éolienne dans différentes conditions environnementales, fournissant ainsi des données cruciales pour son dimensionnement optimal et sa durabilité. Les résultats de cette analyse contribuent à améliorer la compréhension des performances des éoliennes verticales de type Darrieus H.

Remerciement

Nous tenons à remercier M. Mathieu Renouf, pour son dévouement, son soutien et ses conseils tout au long de ce projet.

Nous aimerions, de plus, remercier M. Yann Monerie, pour le temps investit dans notre projet et le changement de paradigme qu'il a apporté à notre problème ainsi que M. Alexandre Pinlou qui a su nous guider dans notre utilisation du serveur Meso@LR.

Table des Matières

I Formulation du problème et des hypothèses	5
I.1 Géométrie	5
I.2 Conditions aux limites	5
I.3 Matériau	6
II Calculs éléments finis	7
II.1 Détermination de la force de traînée	7
II.2 Surface d'application de la force	8
II.3 Application de la force du vent	9
II.4 Parallélisation	10
III Analyses	11
III.1 Convergence au maillage	11
III.2 Étude préliminaire	12
III.3 Étude généralisée	15
III.4 Cas critique	16
IV Développements du projet	18
V Conclusion	18

Liste des Figures

1 George Darrieus	4
2 Différents types d'éoliennes verticales - ecosources.org	4
3 Géométrie et dimension de l'éolienne (en mm)	5
4 Force du vent en fonction de la vitesse du vent	7
5 Lignes de courant et champs de vitesse autour de l'éolienne dans le plan normal à \vec{z}	8
6 Lignes de courant et champs de vitesse autour de l'éolienne dans le plan normal à \vec{y}	8
7 Test logique pour un vecteur petit	8
8 Visualisation de ϕ	9
9 Visualisation de θ	9
10 Point sélectionné pour la convergence au maillage	11
11 Flèche maximale en fonction du nombre de noeuds	12
12 Contraintes maximale en fonction de l'angle ϕ à $\theta = 90^\circ$	13
13 Maillage fin (4300 éléments) avec échantillonnage grossier de ϕ (N=10)	13
14 Maillage grossier (2100 éléments) avec échantillonnage fin de ϕ (N=35)	13
15 Contraintes maximale en fonction de l'angle ϕ à $\theta = 90^\circ$	14
16 Contraintes maximale en fonction de l'angle θ à $\phi = 0^\circ$	14
17 Contraintes maximale en fonction de l'angle θ à $\phi = 72^\circ$	14
18 Contraintes maximale de Von Mises en fonction de θ et ϕ	15
19 Contraintes maximale de Von Mises en fonction de θ pour différentes valeurs de ϕ	15
20 Contraintes maximale de Von Mises en fonction ϕ pour différentes valeurs de θ	15
21 Orientation du vent vue de face $\theta = 90^\circ$	16

22	Orientation du vent vue de haut $\phi = 72^\circ$	16
23	Contraintes de Von Mises dans le cas critique	17
24	Coefficient de traînée de la sphère en fonction du nombre de Reynold [2]	19

Introduction

Un des principaux objectifs auxquels les ingénieurs modernes sont confrontés est la diminution de l'impact carbone des industries. C'est dans l'objectif de décarboner notre énergie que les éoliennes ont vu le jour. Plus particulièrement, les éoliennes verticales, comme imaginées par l'ingénieur français George Darrieus. Ces systèmes de plus petites tailles que leurs consœurs plus connues à l'axe de rotation horizontal, ont pourtant des intérêts non négligeables.

La démocratisation de systèmes de cette taille permettrait de rendre des entreprises ou des foyers auto-suffisants en énergie tout en palliant à certains des défauts des éoliennes de plus grandes tailles. Il existe plusieurs types d'éoliennes verticales, certaines sont représentées sur la figure 2.



Figure 1: George Darrieus

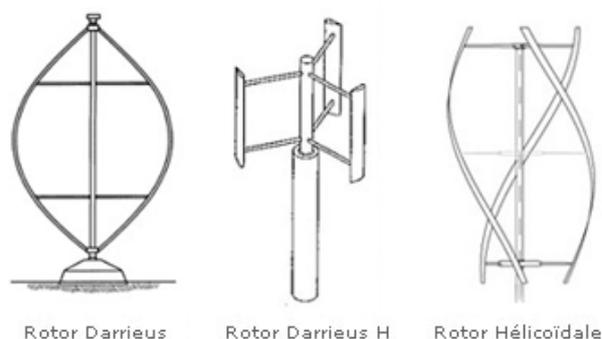


Figure 2: Différents types d'éoliennes verticales
- *ecosources.org*

Ce concept d'éolienne a été breveté par Georges Darrieus, ingénieur aéronautique français en 1931. Cette étude porte sur une éolienne verticale de type Darrieus H. L'objectif est de définir pour quelle orientation du vent l'éolienne sera la plus contrainte et quel sera le point de première plasticité.

I Formulation du problème et des hypothèses

I.1 Géométrie

L'éolienne est composée de plusieurs parties. Le mât sur lequel repose le corps de l'éolienne composé du rotor et de trois pâles. La figure 3 représente la géométrie avec les longueurs utilisées dans cette étude.

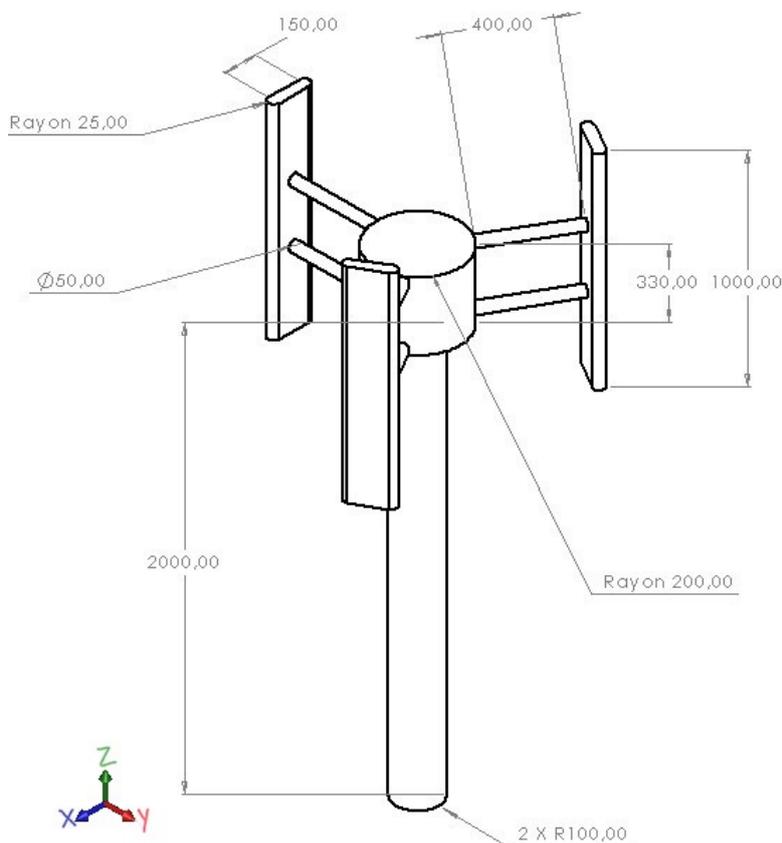


Figure 3: Géométrie et dimension de l'éolienne (en *mm*)

La géométrie a été réalisée sur Gmsh [6] exportée au format UNV puis importée sur Castem [1] pour l'analyse éléments finis.

I.2 Conditions aux limites

- Le pilier est encastré dans le sol considéré indéformable.
- L'étude sera composée d'une succession de calculs statiques réalisés pour une direction et un sens de vent variable dans le cas où l'éolienne serait bloquée en rotation.
- La forme de l'écoulement autour de l'éolienne dépend de la topographie de son environnement. Ici, l'éolienne est considérée comme étant sur un terrain plat, sans inégalité au niveau du sol. L'écoulement est considéré laminaire loin de l'éolienne, autrement dit, les modifications de l'écoulement par l'environnement de l'éolienne sont négligées.

Calcul de R_e :

$$R_e^i = \frac{U_0^i L \rho}{\mu}$$

$$R_e^1 \leq Re \leq R_e^{12}$$

$$1,7 \cdot 10^5 \leq Re \leq 2,8 \cdot 10^6$$

avec :

- U_0^1 La vitesse du vent de mise en mouvement ($2m/s$)
- U_0^i La vitesse en amont de l'éolienne pour une vitesse de vent lié à l'indice i de l'échelle de Beaufort [1]
- L L'échelle caractéristique de l'éolienne en m
- μ La viscosité dynamique de l'air à $20^\circ C$ en m^2/s

Le nombre de Reynold étant élevé, les effets de la viscosité sont donc négligeables devant ceux de l'inertie.

La force à appliquer sur l'éolienne est la force de traînée dont l'expression est :

$$F = \frac{1}{2} \rho_{air} S C_D U^2$$

- S La surface d'application de la force (en m)
- U La vitesse du vent (en m/s)
- C_D Coefficient de traînée

Le coefficient C_D dépend de la géométrie ainsi que de la nature de l'écoulement. Il n'est pas connu pour des géométries complexes. Il sera déterminé à l'aide d'une étude de l'écoulement fluide sur Comsol. [5]

I.3 Matériau

Toutes les parties de l'éolienne sont considérées constituées d'un alliage d'aluminium avec un coefficient de Poisson $\nu = 0,34$ et un module de Young $E = 72GPa$. [4]

Le matériau utilisé est un alliage d'aluminium, il est donc sensible au cisaillement. Il sera considéré comme suivant une loi de plasticité de Von Mises. Les calculs sont réalisés dans le cadre des hypothèses d'élasticité linéaire isotrope et des petites perturbations.

II Calculs éléments finis

II.1 Détermination de la force de traînée

Une étude de l'écoulement autour de l'éolienne a été réalisée sur **Comsol** afin de déterminer le coefficient de traînée de l'éolienne. La géométrie dessinée sur **SolidWorks** [7] a été importée sur **Comsol**. Elle est ensuite placée dans un domaine fluide. Celui-ci doit être de taille importante devant la taille caractéristique de l'éolienne pour réduire les effets de bord et les interactions entre l'éolienne et les parois du domaine.

CONDITIONS AUX LIMITES :

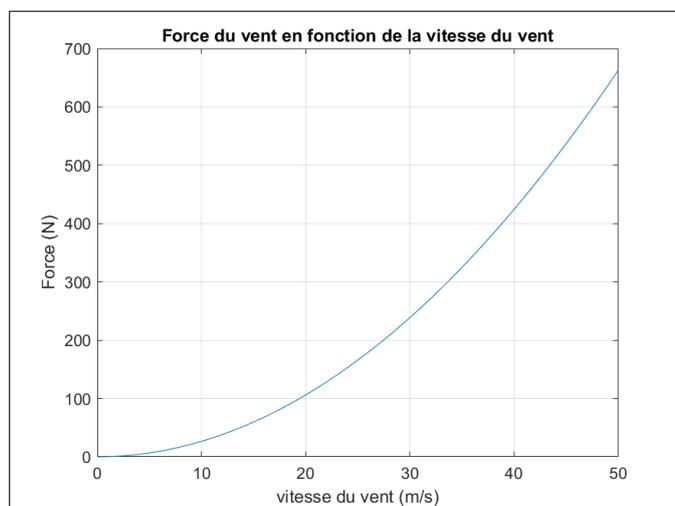
- CL de type Dirichlet homogène, vitesse amont loin du modèle constante $U_0 = 14m/s$.
- La paroi représentant le sol est considérée glissante
- Les parois délimitant la géométrie de l'éolienne sont considérées **non** glissantes
- Les parois délimitant les bords du domaine sont considérés des frontières ouvertes

L'écoulement se faisant pour un nombre Reynold élevé, la composante du coefficient de traînée associée à la viscosité du fluide est négligée face aux termes associés à l'inertie. Il est ainsi possible de mesurer numériquement une approximation du coefficient de traînée C_D permettant de déterminer une évolution de la force du vent en fonction de la vitesse en amont de l'éolienne.

$$C_D = \frac{|F_x|}{\frac{1}{2}\rho_{air}SU_0^2}$$

C_D = le coefficient de traînée F_x = la force de traînée appliquée sur l'éolienne (87,521N)
 U_0 = la vitesse du vent S = la surface où le vent est appliquée ($1,3m^2$)

Finalement, la courbe de la figure [4] représente l'évolution de la force appliquée sur l'éolienne en fonction de la vitesse du vent en amont :



Attention: L'objectif de ce projet ne portant pas sur une étude fluide, l'évolution de C_D en fonction de la vitesse amont du vent n'a pas été caractérisée précisément. En effet, pour une sphère l'évolution de C_D (Annexe, fig: [24]) n'est pas linéaire. S'il en est de même pour une géométrie plus complexe l'évolution de la force en fonction de la vitesse n'est pas aussi simple. Cette évolution n'est donc qu'indicative.

Figure 4: Force du vent en fonction de la vitesse du vent

II.2 Surface d'application de la force

La principale difficulté rencontrée lors de ce projet a été la détermination de la surface où le vent se doit d'être appliqué.

Pour ne prendre en compte que les mailles se trouvant sur la surface de l'éolienne, l'opérateur ENVE natif à Castem permet la création d'une géométrie ne contenant que les nœuds en surface de la structure.

L'étude de l'écoulement sur Comsol pour un champ de vitesse en amont suivant \vec{x} a permis de mettre en évidence que certaines surfaces sont cachées par les parties de l'éolienne en amont de l'écoulement.

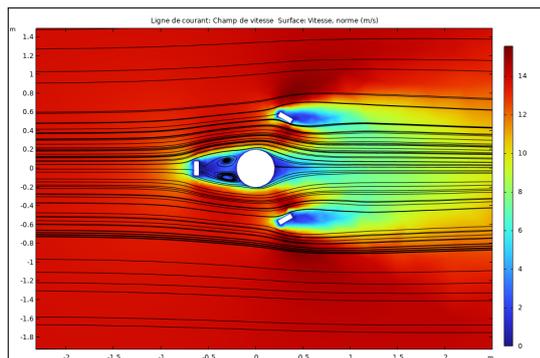


Figure 5: Lignes de courant et champs de vitesse autour de l'éolienne dans le plan normal à \vec{z}

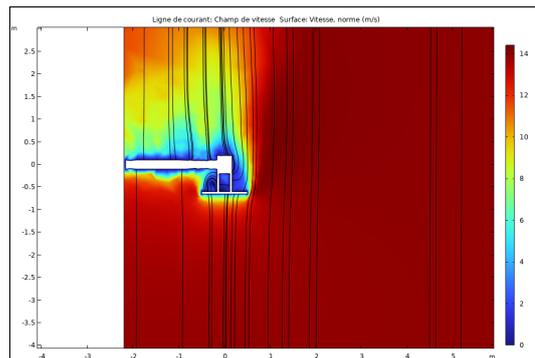


Figure 6: Lignes de courant et champs de vitesse autour de l'éolienne dans le plan normal à \vec{y}

La première solution envisagée a été d'utiliser la normale sortante à chaque élément de l'enveloppe. Ainsi, la force aurait été appliquée uniquement sur les nœuds des éléments pour lesquels le produit scalaire entre leurs normales sortantes et le vecteur directeur du vent est négatif. Cependant, il n'existe pas d'opérateur extrayant la normale pour un élément de maillage sur Castem

VECTEURTEST est une copie du vecteur directeur de l'orientation du vent, normé et rapetissé. Pour sélectionner les nœuds d'application de la force, il a fallu parcourir tous les nœuds de l'enveloppe précédemment définie. À chacun de ses nœuds, un test logique vérifie si VECTEURTEST se trouve dans l'enveloppe. Si le test logique est vérifié, le nœud auquel est effectué le test est un nœud d'un élément faisant face au vent. Le test logique est effectué avec l'opérateur DEDA natif à Castem. Chaque point ainsi sélectionné est ajouté à la géométrie totale référée dans la suite de ce rapport comme GEOVENT.

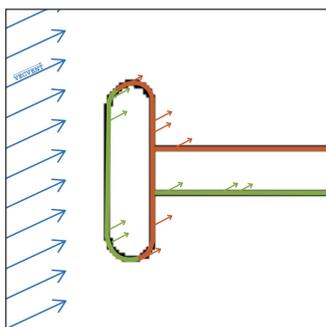


Figure 7: Test logique pour un vecteur petit

Cette méthode ne permet cependant, pas la prise en compte des surfaces cachées par l'écoulement. Une façon de les éliminer eut été de faire varier la taille du vecteur sur lequel le test logique est effectué.

En pratique, c'est la sélection de la surface d'application de la force qui est la plus coûteuse en termes de temps de calcul. Le problème étant tridimensionnel, le temps et la puissance de calcul requise pour mener à bien ces tests logiques à rendu impossible la mise en place d'une méthode faisant varier la taille du vecteur test.

De plus, le nombre de Reynold étant élevé, l'écoulement autour de l'éolienne devrait donc être turbulent, complexifiant, plus encore, les conditions de chargement. Un chargement simplifié ne prenant en compte que les surfaces faces a l'écoulement sera donc appliqué, par la suite, sur l'éolienne.

II.3 Application de la force du vent

Pour pouvoir représenter toutes les directions de chargement, l'éolienne est conservée immobile et la direction du vent varie. Le vecteur directeur de la vitesse du vent est repéré dans le repère sphérique par deux angles ϕ et θ .

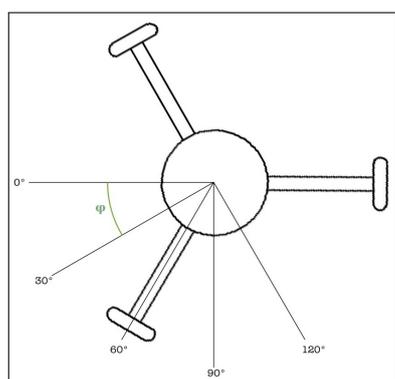


Figure 8: Visualisation de ϕ

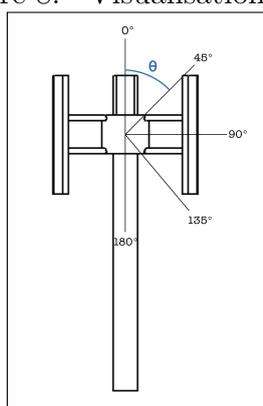
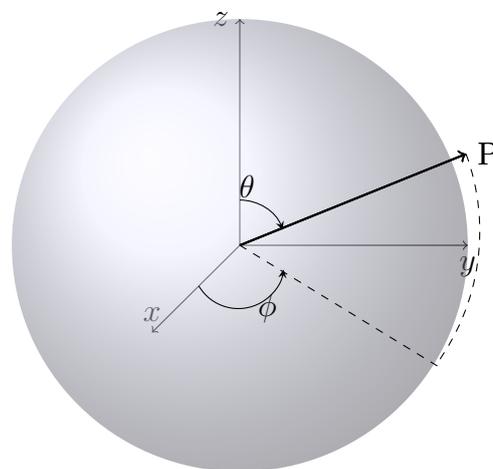


Figure 9: Visualisation de θ



Pour couvrir l'ensemble des sens et des directions de la sphère unité que le vent peut prendre ϕ et θ devraient, tout deux, appartenir à l'intervalle $[0; 360]$. Cependant, les symétries de la géométrie du système permettent de restreindre les domaines de définitions de θ et ϕ .

$$\phi \in [0; 120]$$

$$\theta \in [0; 180]$$

La force est appliquée avec l'opérateur **FORCER**, elle est appliquée à chaque nœud du maillage. Afin d'avoir la même intensité de force appliquée sur la structure quelle que soit la taille du maillage étudié, la valeur de la force a été répartie sur le nombre de nœuds de **GEOVENT**. D'autres opérateurs **Castem** tels que **FSUR** ou **PRES** auraient permis une telle application, cependant, ces opérateurs ne permettent pas de sélectionner l'orientation d'application de la force.

Les forces appliquées dans le repère cartésien sont donc :

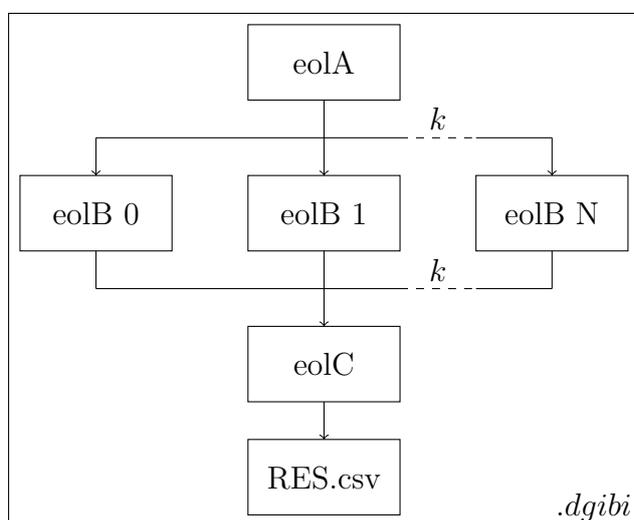
$$\begin{cases} F : \text{Amplitude de l'effort appliqué} \\ F_x = F \sin(\phi) \sin(\theta) \\ F_y = F \cos(\phi) \sin(\theta) \\ F_z = F \cos(\theta) \end{cases}$$

II.4 Parallélisation

Le programme exécuté par **Castem** est constitué de 3 boucles de répétitions imbriquées.

- Une première boucle itérant sur les valeurs de ϕ
- Une seconde itérant sur les valeurs de θ
- Une troisième, itérant sur tous les nœuds de l'enveloppe de l'éolienne, sélectionnant ceux qui constituent **GEOVENT**

Pour une étude des contraintes dans l'éolienne ayant pour variable, simultanément ϕ et θ échantillonné convenablement, les temps de calculs sont significatifs. Pour diminuer le temps global de résolution du problème, les calculs ont été en partie parallélisés.



L'utilisation conjointe des opérateurs **SAUV** et **REST** de **Castem** a permis de découper la partie la plus chronophage du calcul, soit la sélection de la surface d'application de la force, en plusieurs sous-parties qui ont pu être lancées simultanément sur plusieurs processeurs du serveur **Meso@LR**.

Le serveur **Meso@LR** est un serveur de calcul uniquement accessible en lignes de commandes **Bash**. 28 des processeurs du serveur ont été mis à disposition de cette étude.

Ici : $k \in \llbracket 0; N \rrbracket$ et $N = 27$.

La parallélisation des calculs a notamment été employée lors de l'exécution de calculs utilisant un maillage relativement fin et/ou pour les calculs concernant la convergence au maillage.

En pratique, ce sont les fichiers **.dgibi** qui ont été découpés en 28 fichiers dont la création a été réalisée par un script **Python** :

- **eolA** sert à la paramétrisation du problème: données matériaux et lecture de la géométrie.
- **eolB** sélectionne les surfaces d'application du chargement
- **eolC** récupère et assemble les résultats obtenus par l'exécution des **eolB**, lance la résolution et génère un fichier **.csv** contenant les données d'étude.

Les temps d'exécution de `eo1A` et de `eo1C` étant négligeables devant ceux des `eo1B`, la parallélisation a, approximativement, permis de diviser les temps de calculs par 28. La parallélisation des exécutions des programmes `eo1B` a permis des avancées majeures du projet, notamment concernant la convergence au maillage et l'étude générale de l'éolienne avec une meilleure discrétisation des orientations du vent.

III Analyses

III.1 Convergence au maillage

Une convergence au maillage est effectuée pour pouvoir vérifier la validité des simulations mises en place. Il faut déterminer à partir de quelle taille de maille les résultats obtenus sont convenables.

Plus les mailles seront de petite tailles plus les résultats seront proche de la situation réelle. En outre, plus le maillage est fin plus le nombre d'inconnues du problème augmente, multipliant le temps de calcul global. Pour un problème tridimensionnel, chaque nœud ajouté augmente de 3 le nombre de degrés de liberté et donc d'inconnues du problème. L'étude tridimensionnelle est donc rendue complexe car très coûteuse en temps de calculs.

La convergence au maillage a été réalisée pour une orientation du vent fixée telle que : $\phi = 60^\circ$ et $\theta = 90^\circ$. Effectuer cette analyse pour chaque orientation du vent aurait demandé une puissance de calcul trop importante, qui n'était pas disponible.

Les calculs ont été effectués pour le point de coordonnées $(0, r, 0)$ choisi arbitrairement sur le rotor, de rayon r , de l'éolienne.

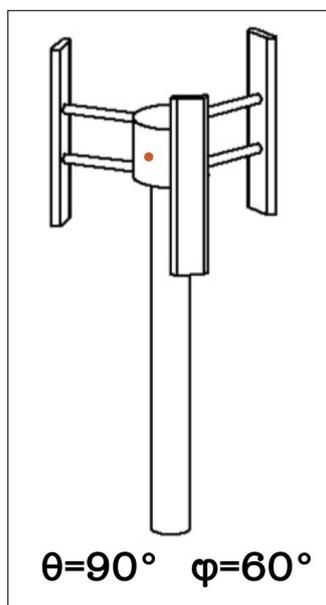


Figure 10: Point sélectionné pour la convergence au maillage

La figure 11 représente l'évolution de la flèche maximale au point sélectionné plus tôt.

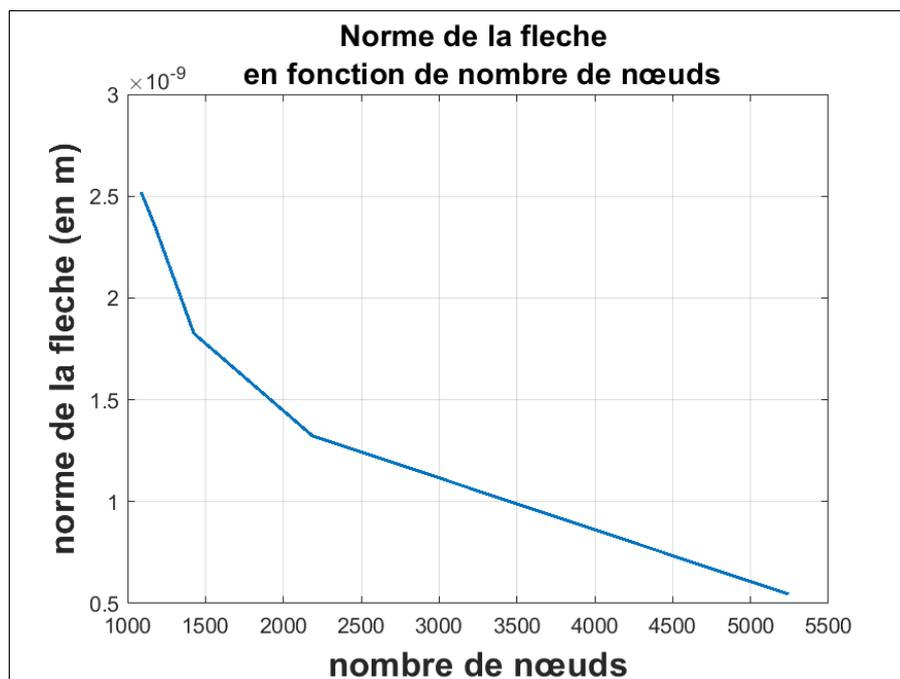


Figure 11: Flèche maximale en fonction du nombre de noeuds

Étonnamment, la norme de la flèche semble décroître avec le nombre d'éléments. En effet, chaque élément ajouté "assoupli" la structure. La flèche devrait tendre vers une asymptote horizontale par valeurs croissantes.

Le maillage est supposé convenable si la valeur des résultats n'excède pas 5% de la valeur atteinte par l'asymptote horizontale. Bien que parallélisés, les calculs ne permettent pas la convergence des résultats et le temps de calculs pour un maillage légèrement plus fin dépassant les 48h les résultats obtenus par la suite admettent une marge d'erreur non-négligeable mais non-quantifiable.

III.2 Étude préliminaire

Tout d'abord, dans le cadre de cette étude, il est pertinent de regarder pour quelle orientation du vent l'éolienne est la plus contrainte.

Dans un premier temps, les calculs ont été effectués en fixant la valeur de l'un des deux angles. Les calculs étant très longs, ceci permet d'avoir une première idée de la direction du vent la plus critique pour l'éolienne. L'étude est réalisée avec un maillage relativement fin (soit 4000 éléments) et avec 10 itération sur l'angle variable. Dans un premier temps pour θ fixé, une étude a été réalisé faisant varier ϕ . Cependant, en considérant les symétries, la continuité des contraintes permettrait d'attendre $\sigma_{max}(\phi)$ tels que :

$$\sigma(120^\circ) = \sigma(0^\circ)$$

En fixant $\theta = 90^\circ$ et avec ϕ allant de 0° à 120° la figure [12](#) est obtenue.

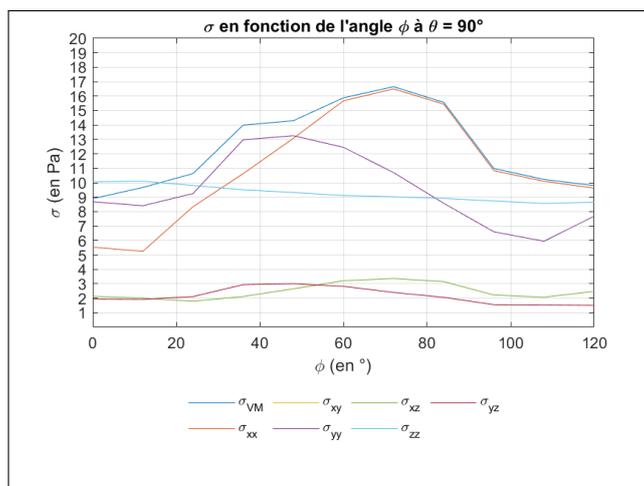


Figure 12: Contraintes maximale en fonction de l'angle ϕ à $\theta = 90^\circ$

N'observant pas l'égalité souhaitée, une étude sur 360° a été réalisée. Et la puissance de calcul ne permettant pas de réaliser l'étude avec un maillage de bonne qualité et un nombre d'itération N élevée sur l'angle. Deux calculs ont été réalisés en faisant varier ces différents paramètres sur les figures [13](#) et [14](#).

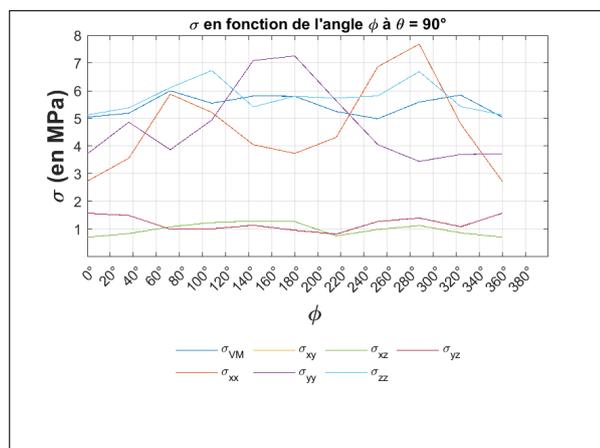


Figure 13: Maillage fin (4300 éléments) avec échantillonnage grossier de ϕ ($N=10$)

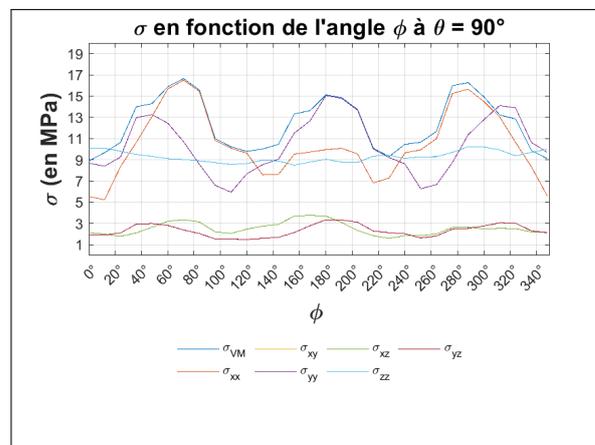
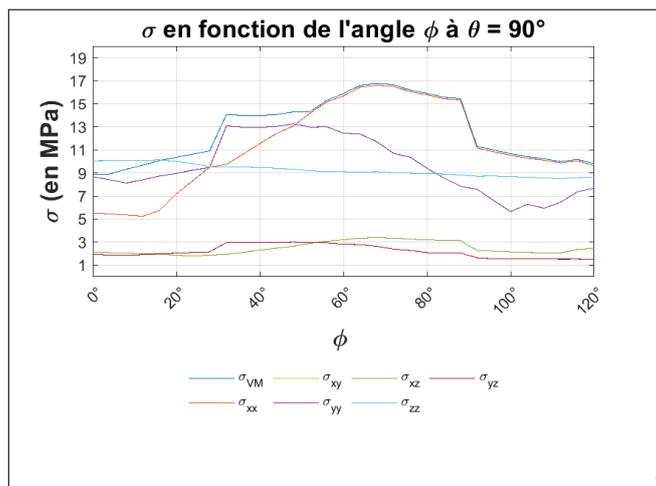
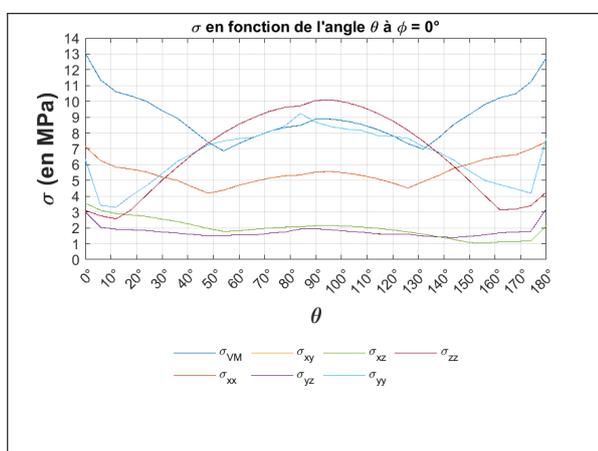
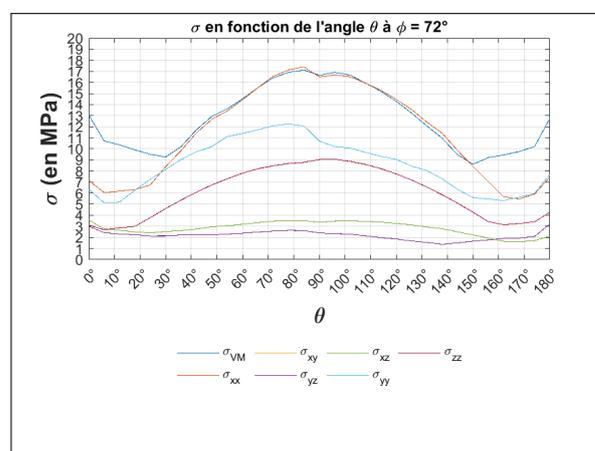


Figure 14: Maillage grossier (2100 éléments) avec échantillonnage fin de ϕ ($N=35$)

Pour un échantillonnage grossier de ϕ un lissage des pics de contrainte s'observe sur la figure [13](#). Une grande partie de l'information est donc perdue pour des calculs pour un échantillonnage grossier. En revanche les résultats obtenus pour un échantillonnage plus fin utilisant un maillage plus grossier permettent une meilleure appréhension des résultats. Les résultats suivants ont été obtenus en utilisant un maillage relativement grossier, mais avec un échantillonnage fin comme compromis. Soit dans les mêmes conditions que la figure [14](#)

Figure 15: Contraintes maximale en fonction de l'angle ϕ à $\theta = 90^\circ$ Figure 16: Contraintes maximale en fonction de l'angle θ à $\phi = 0^\circ$ Figure 17: Contraintes maximale en fonction de l'angle θ à $\phi = 72^\circ$

Les contraintes σ_{xz} et σ_{yz} sont faibles par rapport aux autres contraintes. Ceci s'explique par le fait que la géométrie est élancée dans la direction \vec{z} . Elle offre donc peu de prise au vent dans la direction \vec{z} la structure subit donc moins de cisaillement dans cette direction. En effet, plus le vent est orienté selon cet axe plus la surface d'application de la force est réduite.

σ_{xy} et σ_{yy} sont identiques ce qui indique une certaine symétrie dans les conditions de chargement ou dans la géométrie de la structure.

Les contraintes de Von Mises σ_{VM} rendent compte du cisaillement, ici la plus grande contribution est dû aux contraintes σ_{xy} .

Il est noté que trois valeurs de θ présentent des contraintes significatives : 0° , 90° et 180° , ce qui correspond respectivement à : un vent venant d'en bas de l'éolienne, un vent face à l'éolienne et un vent venant d'en haut. De plus, le maximum des contraintes de Von Mises et des contraintes σ_{xx} semble être atteint autour de 70° selon ϕ . La poursuite de l'étude se concentrera exclusivement sur l'analyse des contraintes de Von Mises, étant donné que le point de première plasticité est recherché.

III.3 Étude généralisée

Ensuite, une étude a été entreprise pour déterminer le couple (ϕ, θ) pour lequel les contraintes de Von Mises sont maximales. Pour effectuer ces calculs, il était nécessaire de les paralléliser. Cela a impliqué la création de 28 fichiers `.dgibi`, chacun pour un angle ϕ fixé, avec une boucle sur θ , exécutés sur le serveur de calcul Meso@LR.

Pour avoir un ordre d'idée des contraintes de Von Mises maximales, le choix de les tracer en fonction de ϕ et θ a été fait.

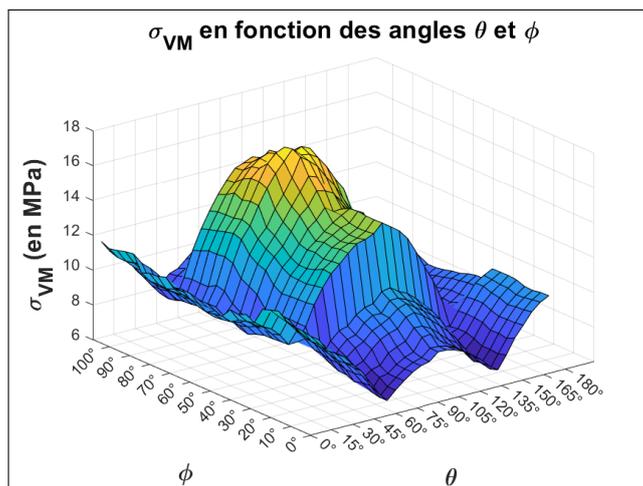


Figure 18: Contraintes maximale de Von Mises en fonction de θ et ϕ

La figure 18 est la surface représentant les contraintes maximales de Von Mises pour θ et ϕ variables. Les contraintes de Von Mises les plus importantes sont comprises entre des valeurs remarquables de θ et ϕ . Pour rendre compte de ceci les figures 19 et 20 ont été tracées :

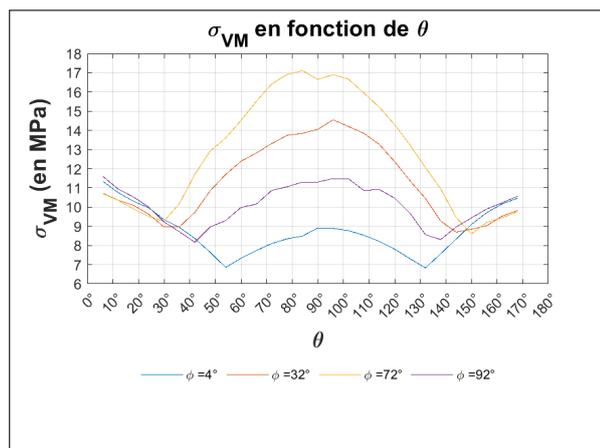


Figure 19: Contraintes maximale de Von Mises en fonction de θ pour différentes valeurs de ϕ

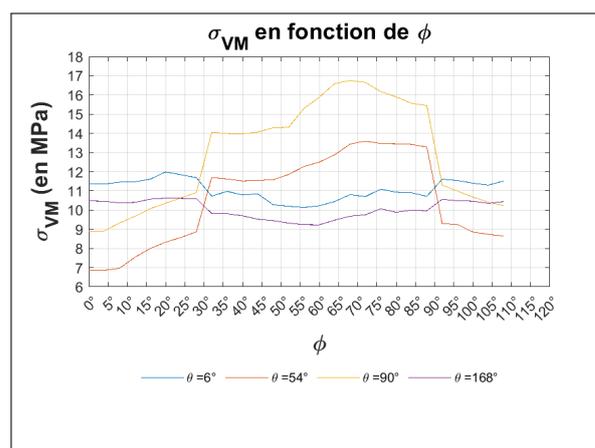


Figure 20: Contraintes maximale de Von Mises en fonction ϕ pour différentes valeurs de θ

Le maximum des contraintes est compris entre $\phi = 32^\circ$ et $\phi = 90^\circ$. Pour ces valeurs, les contraintes maximums sont atteintes en $\theta = 90^\circ$: ceci correspond au moment où le vent est parallèle au sol.

Pour les autres valeurs de l'angle ϕ les courbes sont comprises entre celles de $\phi = 4$ et $\phi = 92^\circ$: pour ces valeurs les contraintes maximums sont atteintes en $\theta = 0$ ou $\theta = 168^\circ$. Leurs minimums semblent être autour de $\theta = 50^\circ$. Les contraintes de Von mises ont été tracées en fonction de ϕ pour ces valeurs remarquables de θ . Deux sauts de contraintes sont visibles sur la figure 20, le maximum est compris entre les deux : pour $\phi \approx 30^\circ$ et $\phi \approx 90^\circ$

Il est visible aussi sur ce graphique que les contraintes les plus importantes sont comprises pour les valeurs de ϕ comprises entre 30° et 90° . Pour les différents θ il y a une augmentation des contraintes de Von Mises importante pour $\phi \approx 30^\circ$ et une nette diminution en $\phi \approx 90^\circ$. L'augmentation de la contrainte est encore une fois due au contact du vent avec la pale, mais aussi au contact du vent avec le support de la pale. Le maximum des contraintes est atteint pour $\phi = 72^\circ$. Le vent est face à la pale et créer un effort de flexion en plus de celui de compression au niveau du support reliant la pale au rotor.

La situation la plus critique sera prise pour $\phi = 72^\circ$ et $\theta = 90^\circ$

III.4 Cas critique

Maintenant que la direction du vent pour laquelle la géométrie est la plus sollicitée a été déterminée, une étude de cette situation est faite. L'objectif est d'analyser les contraintes de Von Mises dans cette situation. Le matériau plastifie suivant une loi de Von Mises, le point ayant la contrainte de Von Mises la plus élevée peut être considéré comme étant le point de première plasticité.

Un vent dans la situation la plus critique est alors appliqué : $\theta = 90^\circ$ et $\phi = 72^\circ$, comme visible respectivement sur les figures 21 et 22

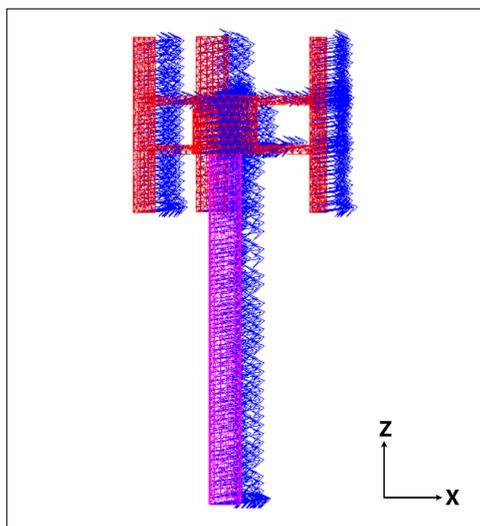


Figure 21: Orientation du vent vue de face
 $\theta = 90^\circ$

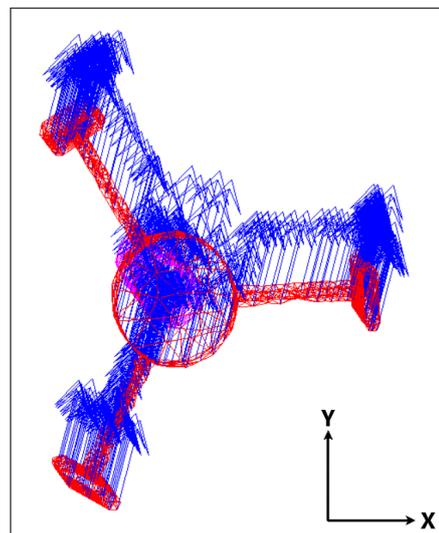


Figure 22: Orientation du vent vue de haut
 $\phi = 72^\circ$

Les contraintes de Von Mises par rapport à ces angles sont représentées graphiquement sur la figure 23. Les principales zones contraintes dans la structure semblent être les zones travaillant en flexion.

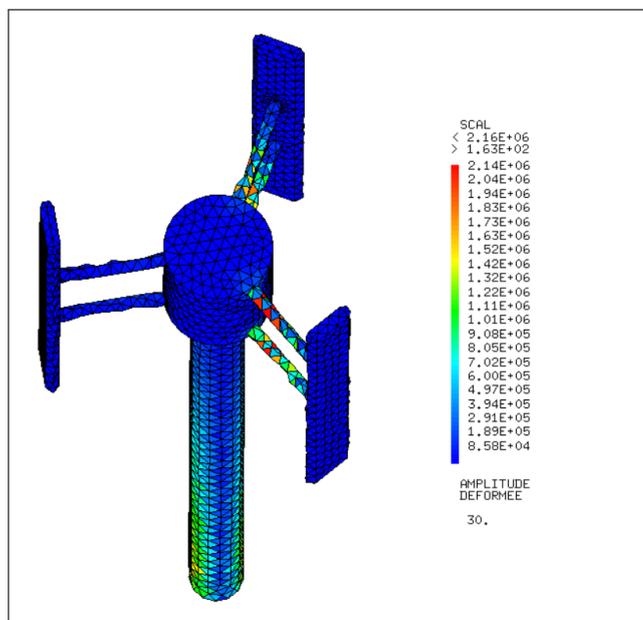


Figure 23: Contraintes de Von Mises dans le cas critique

Pour une approche RDM sur une poutre cylindrique de diamètre d , la contrainte maximale pour une sollicitation de flexion simple est telle que :

$$|\sigma_{max}| = y \frac{|M_f|}{I_{Gz}}$$

où $I_{Gz} = \frac{\pi d^4}{64}$ le moment de flexion, croissant avec la section.

Le point le plus contraint se trouve alors sur un des supports reliant les pâles au rotor. En effet, il s'agit de la plus petite section de l'éolienne, le moment de flexion de ce support est donc le plus petit de la structure.

Le point de première plasticité apparaît sur le support non loin de l'encastrement support-rotor. Cependant, le support travaillant en flexion le critère de plasticité respecté par cette poutre est inférieur au critère de plasticité de Von Mises en traction. Dans un objectif de dimensionnement, une attention particulière se devra d'être apportée à l'étude théorique de la plasticité de cette structure si elle se doit d'être très fortement chargée.

IV Développements du projet

Sont listé ci-dessous des axes de réflexions selon lesquels l'étude aurait de cette éolienne verticale aurait pu se développer.

- **Anisotropies** introduites par l'utilisation d'un pilier en fibre de verre.
- **Plasticité** : étude théorique poussée du chargement local des éléments les plus chargés de la structure en vue d'une analyse en limites de plasticité.
- **Variation de géométrie** : étude de l'impact de la forme des pales et des dimensions de l'éolienne.
- **Calculs dynamiques** : L'éolienne étant, par essence un système en rotation, l'étude avec des forces suiveuses de la rotation de l'éolienne aurait constitué un axe de développement judicieux.
- **Modéliser les différentes pièces seuls** et porter l'étude sur l'impact de différentes solutions techniques d'encastrement notamment réalisées par soudure ou visserie.

V Conclusion

En conclusion, l'étude de cette éolienne verticale de type Darrieus H a été une expérience enrichissante malgré les défis rencontrés. Ce projet a permis l'exploration du domaine complexe de la modélisation et de la simulation numérique, tout en se heurtant à des problèmes techniques significatifs.

L'un des principaux obstacles, a résidé dans la convergence vers une solution réaliste. Malgré les efforts déployés pour contrer les problèmes de temps de calcul, des difficultés ont persisté, impactant ainsi la précision des résultats et prolongeant le temps nécessaire pour obtenir des simulations valides.

De plus, bien que la plupart des calculs aient été parallélisés pour accélérer le processus, des problèmes de temps de calcul plus long que prévu sont survenus. Cela a non seulement ralenti la progression, mais a également limité le nombre de scénarios explorés et analysés en profondeur.

Cependant, malgré ces défis, ce projet a permis une compréhension approfondie des contraintes techniques et des considérations pratiques liées à la modélisation et à la simulation éléments finis.

En fin de compte, ces défis nous ont également permis le développement de compétences en résolution de problèmes et en gestion de projet, renforçant ainsi notre expérience ainsi que notre expertise dans ce domaine en constante évolution.

ANNEXE

Force	Désignation	km/h	m/s	Noeuds	Effet
0	Air calme	< 1	< 0,3	< 1	Rien du tout
1	Air léger	1 - 5	0,3 - 1,5	1 - 3	Dérivation de la fumée
2	Légère brise	6 - 11	1,6 - 3,3	4 - 6	Contractions des feuilles
3	Brise légère	12 - 19	3,4 - 5,4	7 - 10	Mouvement des branches
4	Vent modéré	20 - 28	5,5 - 7,9	11 - 15	Mouvement des membres
5	La brise fraîche	29 - 38	8,0 - 10,7	16 - 21	Déplacement des petits arbres
6	Forte brise	39 - 49	10,8 - 13,8	22 - 27	Mouvement des branches fortes
7	Vent fort	50 - 61	13,9 - 17,1	28 - 33	Déplacement des arbres
8	Coup de vent	62 - 74	17,2 - 20,7	34 - 40	Difficulté à marcher
9	Coup de vent de ficelle	75 - 88	20,8 - 24,4	41 - 47	Dommages à la maison
10	Tempête	89 - 102	24,5 - 28,4	48 - 55	Déracinement d'arbres
11	Tempête violente	103 - 117	28,5 - 32,6	56 - 63	Tempête
12	Ouragan	> 118	> 32,7	> 64	Dévastation

Table 1: Échelle de Beaufort 3

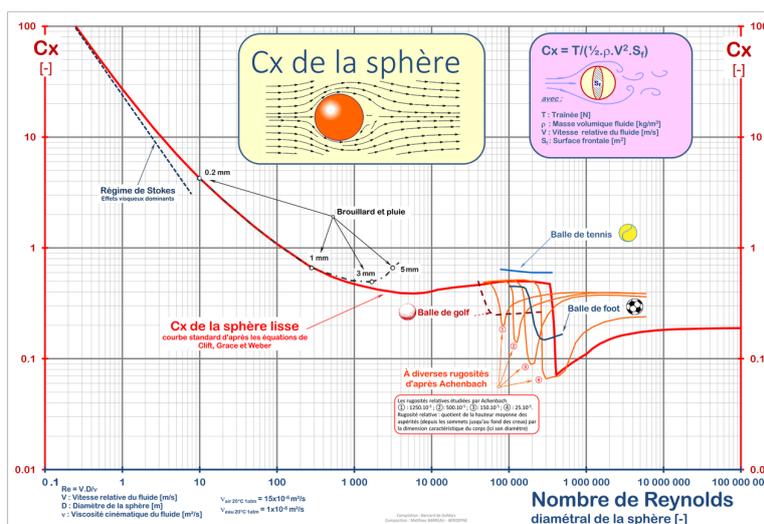


Figure 24: Coefficient de traînée de la sphère en fonction du nombre de Reynold 2

References

- [1] CEA. *téléchargement Castem*. URL: <https://www-cast3m.cea.fr/index.php?xml=download1>.
- [2] *Coefficient de trainée en fonction du nombre de Reynold*. URL: https://fr.wikipedia.org/wiki/Coefficient_de_tra%C3%AEn%C3%A9e#/media/Fichier:CX_SPHERE.png.
- [3] *Echelle de Beaufort*. URL: <https://fr.wind-turbine-models.com/winds>.
- [4] *Informations générale sur les éoliennes verticales*. URL: <https://www.eolienne-domestique.org/eoliennes-darrieus/>.
- [5] *téléchargement Comsol*. URL: <https://www.comsol.fr/product-download>.
- [6] *téléchargement Gmsh*. URL: <https://gmsh.info/doc/texinfo/gmsh.html>.
- [7] *téléchargement SolidWorks*. URL: <https://www.solidworks.com/fr/support/free-downloads/>.