

Rapport du projet Modélisation & Simulation Multi-Physique **Etude d'une éolienne tripale**



Réalisé Par :

Sadik Omar

Moussaid Anass

Encadré par :

Mme. Ait El Haj Badia

Mr. Chaaba Moulay Ali

Section 3

Remerciements :

Nous tenons à exprimer nos plus sincères remerciements à nos encadrants, pour leur contribution inestimable tout au long du projet de conception et de simulation d'une éolienne tripale.

Leur encadrement attentif, leurs conseils éclairés et leur expertise ont joué un rôle déterminant dans la réussite de ce projet. Leur disponibilité constante et leur capacité à partager leurs connaissances ont grandement enrichi notre expérience, nous guidant efficacement à travers les défis techniques rencontrés.

Nous sommes reconnaissants pour le soutien continu de nos encadrants, qui ont été des mentors dévoués, partageant avec nous leur passion pour le domaine de l'énergie éolienne. Leur contribution a été essentielle pour l'acquisition de compétences techniques et la compréhension approfondie des enjeux liés à la conception d'une éolienne tripale.

Ce projet a représenté une opportunité exceptionnelle d'apprentissage, et nous tenons à exprimer notre gratitude envers nos encadrants pour avoir été des guides exemplaires tout au long de ce parcours. Leur engagement a largement contribué à notre développement professionnel et académique.

Nous sommes reconnaissants pour les leçons précieuses que nous avons tirées de cette expérience et sommes impatients d'appliquer ces compétences et connaissances dans notre vie professionnelle future. Encore une fois, un sincère merci à chacun d'entre vous pour votre contribution inestimable et votre soutien continu.

Table des matières

Remerciements :	2
Introduction :	4
Chapitre 1 : Présentation du projet	5
1. Préliminaire du projet :	5
2. Conversion d'énergie :	5
3. Composants clés d'une éolienne :	6
4. Géométrie d'une pâle d'éolienne :	7
5. Force aérodynamique agissant sur la pâle :	8
6. Puissance d'une éolienne :	8
Chapitre 2 : Partie aérodynamique	11
1. Objectifs :	11
2. L'écoulement de l'air autours d'un profil de forme ‘ cercle ’	11
a. Description du problème :	11
b. Dessiner la géométrie :	11
c. Maillage du domaine fluide :	12
d. Configuration :	13
e. Solution :	15
3. L'écoulement de l'air autours d'un profil NACA 2412	17
a. Importation du profil NACA :	17
b. Description du problème :	18
c. Dessiner la géométrie :	18
d. Maillage du domaine fluide :	19
e. Configuration :	21
f. Solution :	22
4. Simulation de la pâle en 3D	27
a. Dessiner la géométrie :	27
b. Maillage du domaine fluide :	27
c. Configuration :	28
d. Solution :	29
Chapitre 3 : Partie structure	32
1. Calcul d'épaisseur du mat	32
a. Calcul analytique :	32
b. Calcul numérique :	35

Introduction :

Le développement durable et la transition énergétique sont au cœur des préoccupations actuelles, poussant les ingénieurs et les chercheurs à concevoir des solutions novatrices pour exploiter les énergies renouvelables. L'énergie éolienne est l'une de ces sources d'énergie propres et durables, offrant un potentiel considérable pour répondre aux besoins croissants en électricité. Dans le cadre du module "Modélisation et simulation multiphysique dans l'environnement du logiciel ANSYS", nous aborderons la conception d'une éolienne tripale, un dispositif emblématique de la conversion d'énergie éolienne en électricité.

L'éolienne tripale est un système complexe qui nécessite une analyse approfondie des différentes interactions physiques en jeu, telles que la mécanique des fluides, la dynamique des structures, et l'aéroélasticité. Ce projet vise à explorer les aspects théoriques et pratiques de la modélisation et de la simulation multiphysique pour optimiser la performance et la fiabilité d'une éolienne tripale.

Dans cette deuxième partie du module, nous approfondirons notre compréhension des outils de simulation avancés offerts par le logiciel ANSYS. Ce logiciel renommé permet d'effectuer des analyses multiphysiques en intégrant différentes disciplines d'ingénierie, offrant ainsi une plateforme complète pour modéliser le comportement complexe des éoliennes. Nous explorerons les fonctionnalités d'ANSYS qui nous permettront de simuler les phénomènes physiques tels que la distribution de pression sur les pales, la déformation des structures sous l'effet des charges aérodynamiques, et la réponse dynamique du système complet.

L'objectif principal de ce projet est d'acquérir une compréhension approfondie des interactions multiphysiques dans le contexte spécifique de l'éolienne tripale, tout en développant des compétences pratiques dans l'utilisation d'ANSYS pour la modélisation et la simulation. Nous explorerons les défis liés à la conception d'éoliennes, notamment la minimisation des charges dynamiques, l'optimisation des performances aérodynamiques, et la maximisation de la production d'énergie.

Chapitre 1 : Présentation du projet

1. Préliminaire du projet :

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

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

2. Conversion d'énergie :

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

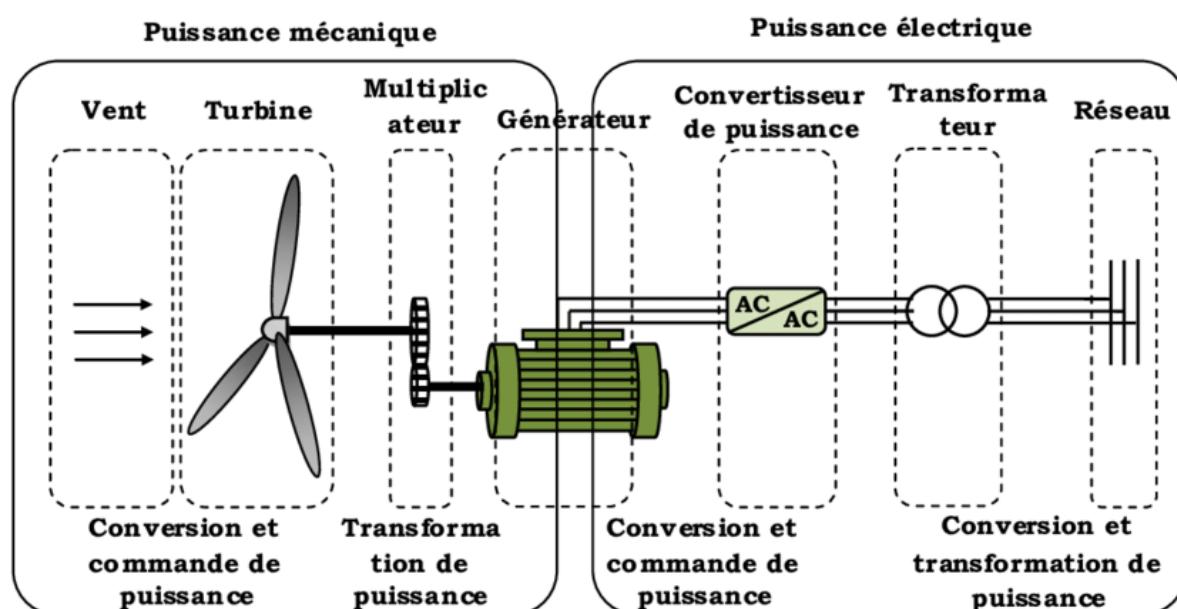


Figure 1 : Schéma de conversion d'énergie.

Les éoliennes utilisent la force du vent pour produire de l'électricité, grâce au principe de fonctionnement de l'alternateur. Un alternateur est un dispositif permettant de transformer l'énergie mécanique en électricité. Il est composé d'une partie fixe, le stator et d'une partie mobile, le rotor. La force du vent sur les pales entraîne le mouvement du rotor. Ce mouvement, allié à l'immobilité du stator, génère un courant alternatif.

La conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique dans une éolienne implique plusieurs étapes. Voici les principales étapes du processus de conversion de l'énergie éolienne :

Capture de l'énergie cinétique du vent par les pales : Les pales de l'éolienne sont conçues de manière à capturer l'énergie cinétique du vent. Lorsque le vent souffle, il exerce une force sur les pales, les mettant en mouvement.

Conversion de l'énergie cinétique en énergie mécanique : Le mouvement des pales conduit à la rotation du rotor, généralement connecté à un moyeu. Cette rotation convertit l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.

Transmission de l'énergie mécanique à la génératrice : L'énergie mécanique du rotor est ensuite transmise à la génératrice située à l'intérieur du mât de l'éolienne. Cette transmission peut se faire par le biais d'un système de transmission mécanique, tel qu'une boîte de vitesses.

Conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique par la génératrice : La génératrice utilise le mouvement mécanique pour induire un champ magnétique dans des bobines de fil électrique. Ceci génère un courant électrique alternatif (CA) dans les bobines selon le principe de l'induction électromagnétique.

Redressement du courant alternatif en courant continu : Le courant alternatif produit par la génératrice est ensuite redressé en courant continu (CC) à l'aide d'un dispositif appelé redresseur. Cela permet de créer une tension continue stable nécessaire pour l'alimentation du réseau électrique.

Régulation de la fréquence et de la tension : Des dispositifs de régulation sont utilisés pour ajuster la fréquence et la tension du courant électrique produit afin de les rendre compatibles avec le réseau électrique auquel l'éolienne est connectée.

Injection de l'énergie électrique dans le réseau : Une fois que le courant a été redressé et réglé, il peut être injecté dans le réseau électrique pour répondre aux besoins en électricité.

Surveillance et contrôle : Un système de surveillance et de contrôle est généralement intégré pour assurer le fonctionnement optimal de l'éolienne. Cela peut inclure des capteurs de vent, des systèmes de suivi pour orienter les pales face au vent, et des dispositifs de sécurité pour protéger l'éolienne contre des conditions météorologiques extrêmes.

3. Composants clés d'une éolienne :

Une éolienne se compose des éléments principaux suivants :

Un mât : a une fonction de soutien. Il permet de placer le rotor à une hauteur suffisante pour permettre son mouvement et son entraînement par des vents plus forts et réguliers qu'au niveau du sol. Le mât abrite généralement une partie des composants électriques et électroniques (par exemple consoles de commande). Les mâts sont communément en acier, mais des mâts en béton sont de plus en plus utilisés par certains producteurs.

Une nacelle : elle est montée au sommet du mât, et abrite les composants mécaniques, pneumatiques, ainsi que les composants électriques et électroniques, nécessaires au

fonctionnement de la machine. La nacelle peut tourner pour orienter les pales par rapport à la direction du vent.

Pales : sont généralement au nombre de trois et sont fixées au moyeu du rotor. Elles sont conçues de manière aérodynamique pour maximiser la capture du vent.

Moyeu : est le composant central du rotor auquel sont attachées les pales. Il transmet le mouvement de rotation des pales à l'arbre de transmission.

Un rotor : Il est composé de plusieurs pales (en général trois) et du nez de l'éolienne, fixé à la nacelle. Le rotor est entraîné par l'énergie du vent, il est rattaché directement ou indirectement (via un multiplicateur de vitesse à engrenages) au système mécanique qui utilisera l'énergie recueillie (pompe, générateur électrique...).

Fondation : qui supporte la superstructure (mât-nacelle-rotor) et qui permet l'ancrage et assure la stabilité de la structure.

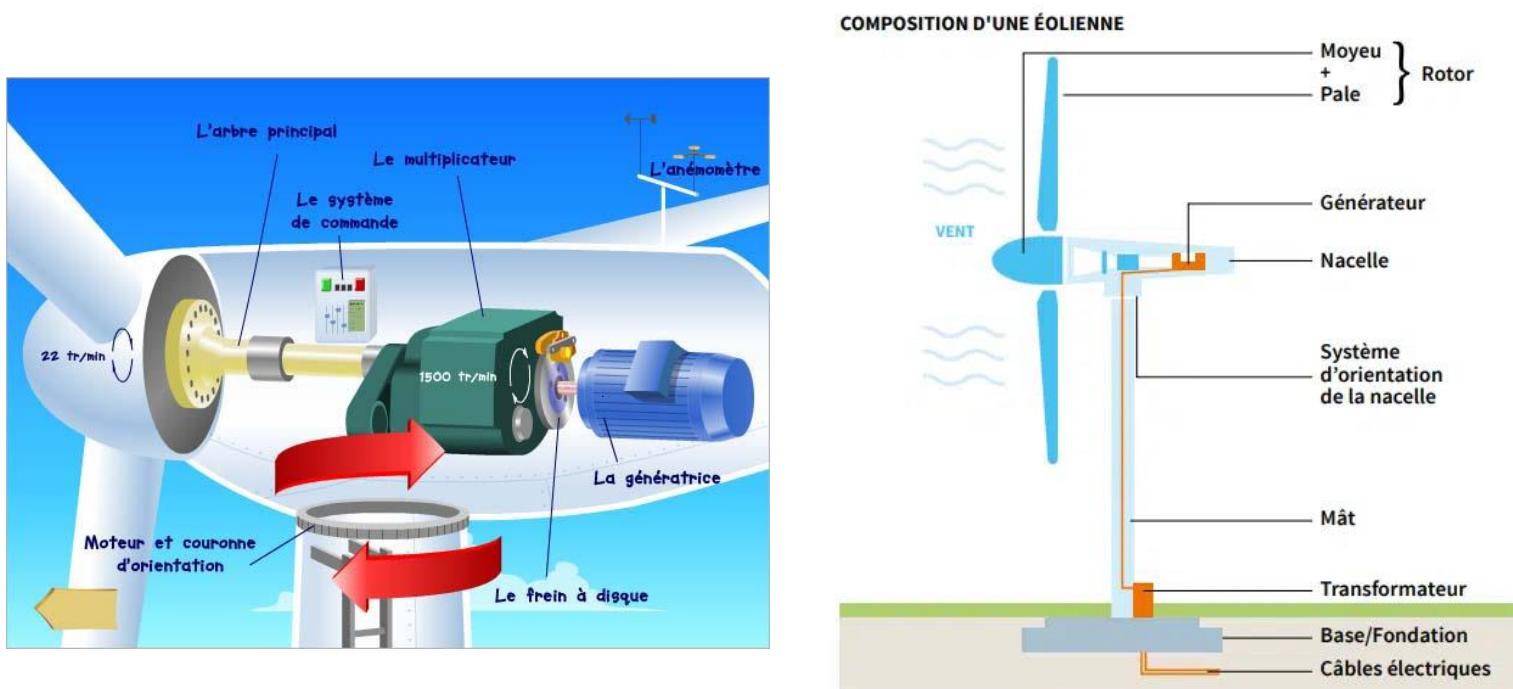


Figure 2 : Composition d'une éolienne.

4. Géométrie d'une pale d'éolienne :

La géométrie d'une pale d'éolienne est soigneusement conçue pour optimiser la conversion de l'énergie éolienne en énergie mécanique. Les pales sont généralement profilées de manière aérodynamique, avec une courbure qui crée une différence de pression entre leur face convexe et leur face concave lorsque le vent les traverse. Cette différence de pression génère une force de portance qui fait tourner la pale autour de son axe. La forme de la pale

est également étudiée pour réduire la traînée, ce qui permet une rotation plus efficace. De plus, la longueur et la largeur de la pale sont calculées en fonction de divers facteurs, tels que la vitesse moyenne du vent dans la région et la taille de l'éolienne, afin d'optimiser la capture de l'énergie éolienne. Enfin, les pales sont souvent conçues avec une torsion le long de leur longueur pour réduire les effets de la turbulence et assurer une production d'énergie stable.

5. Force aérodynamique agissant sur la pale :

La force aérodynamique agissant sur la pale d'une éolienne se compose principalement de deux composantes : la portance et la traînée. **La portance** est la force perpendiculaire au flux d'air incident et est générée principalement par la différence de pression entre la face d'attaque et la face de fuite de la pale. Cette force de portance est responsable de l'entraînement de la pale et de la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique rotative. D'autre part, **la traînée** est la force parallèle au flux d'air incident et est due à la résistance de l'air à la pale en mouvement. Cette traînée a tendance à ralentir la rotation de la pale et donc à limiter l'efficacité globale de l'éolienne. Pour maximiser l'efficacité, les concepteurs d'éoliennes cherchent à minimiser la traînée tout en maintenant une portance suffisante pour produire de la puissance.

En rouge, **P** = la portance

En vert, **T** = la traînée

En orange **R** = la résultante

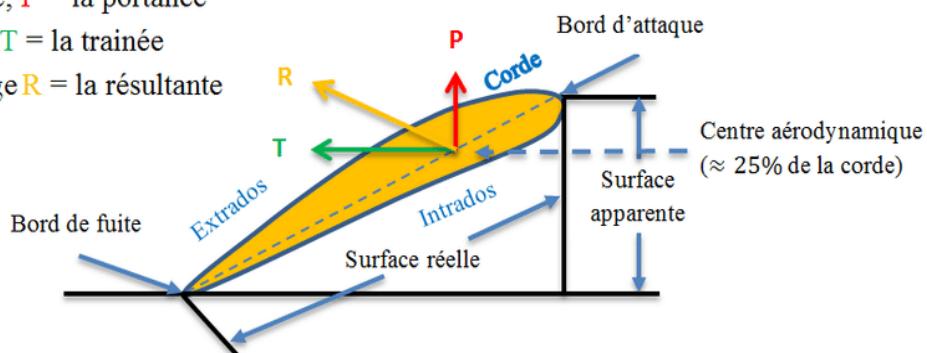


Figure 3 : Forces exercées sur la pale d'une éolienne.

6. Puissance d'une éolienne :

La puissance d'une éolienne tripale est déterminée par plusieurs facteurs, notamment la vitesse du vent et la conception de l'éolienne elle-même. En maximisant la surface de capture du vent et en minimisant la traînée, les éoliennes triples peuvent exploiter au mieux l'énergie éolienne disponible pour produire de la puissance.

La puissance du vent contenue dans un cylindre de section S est :

$$P_{cinétique} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot a \cdot S \cdot V_{turbine}^3$$

$$V_{turbine} = a \cdot V_f$$

V_f : vitesse du fluide au niveau de la turbine (en m/s).

ρ : masse volumique de l'air (air atmosphérique sec, environ : 1,23 kg/m³ à 15 °C et à pression atmosphérique 1,0132 bar).

S : surface projetée du capteur éolien (en m²).

La puissance récupérable est inférieure, puisque l'air doit conserver une énergie cinétique résiduelle pour qu'il subsiste un écoulement. L'allemand Albert Betz a démontré en 1919 que la puissance maximale récupérable est :

$$P_{max} = \frac{16}{27} \cdot P_{cinétique} = \frac{8}{27} \cdot \rho S \cdot v^3$$

Le rendement maximal théorique d'une éolienne est ainsi fixé à **59,3 %**. 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.

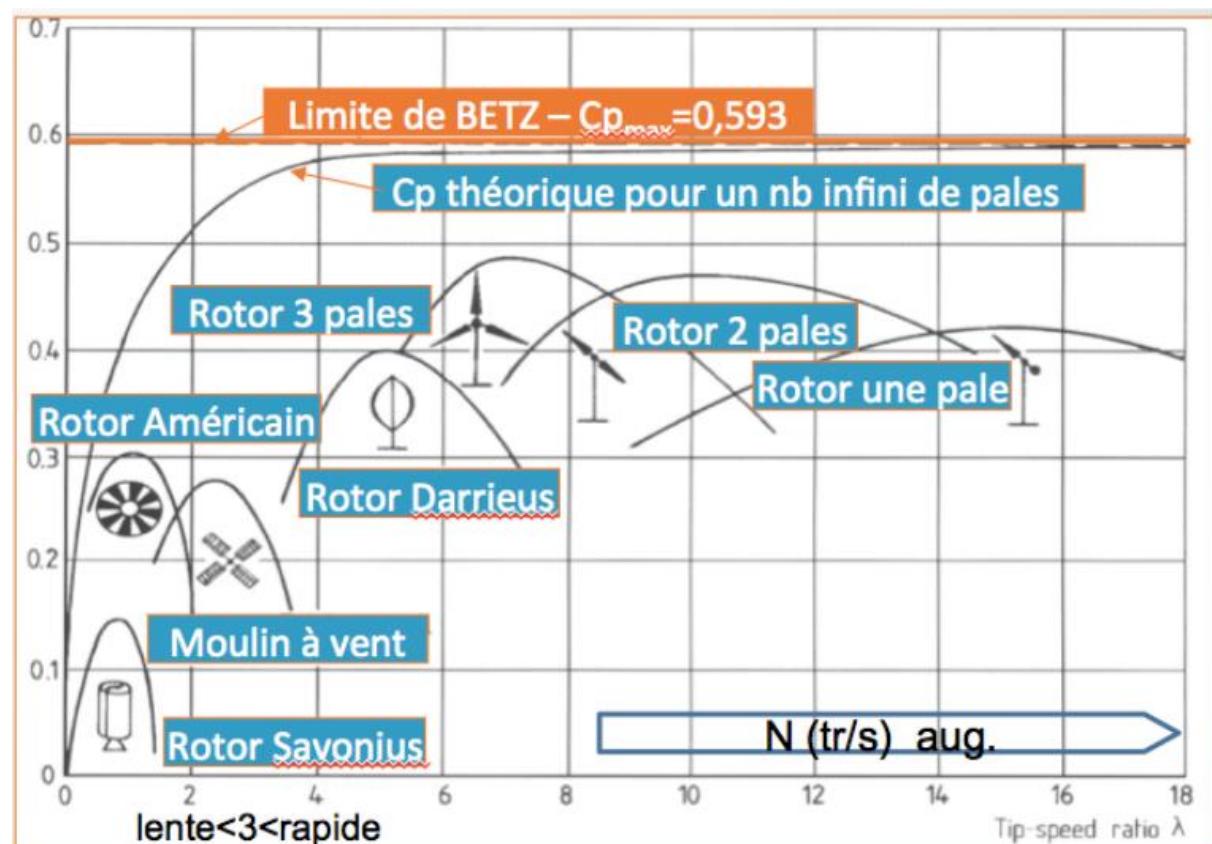


Figure 4 : Rendement de différents types d'éoliennes.

λ_0 correspond au rapport de la vitesse tangentielle en bout de pale divisée par la vitesse du vent.

La courbe de puissance est un graphe qui représente la puissance de sortie d'une éolienne à différentes vitesses de vent. Elle est élaborée à partir de mesures effectuées sur site en fixant un anémomètre sur un mât situé à proximité de l'éolienne et non directement sur l'éolienne même ou trop près de celle-ci car elle risque alors de provoquer des turbulences qui nuiront à la fiabilité des mesures.

On peut distinguer 4 parties sur cette courbe :

- **De 0 à la vitesse de démarrage V_d** : la puissance de sortie est nulle, le vent n'est pas suffisamment important pour entraîner la rotation du rotor
- **De la vitesse de démarrage V_d à la vitesse nominale V_n** : la puissance de sortie augmente jusqu'à atteindre la puissance nominale.
- **De la vitesse nominale V_n à la vitesse de coupure V_m** : la puissance de sortie est maintenue à la puissance nominale presque constante grâce au dispositif de régulation.
- Après **la vitesse de coupure V_m** : l'éolienne est mise à l'arrêt pour protection, la puissance de sortie est nulle.

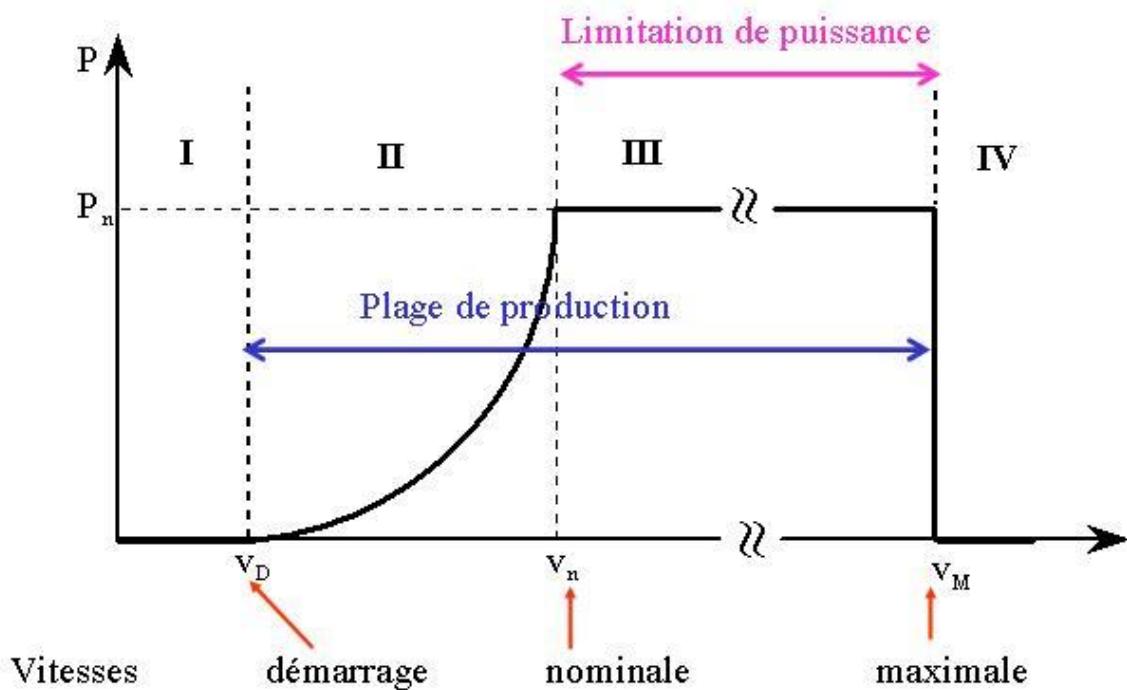


Figure 5 : Courbe de puissance d'une éolienne.

Chapitre 2 : Partie aérodynamique

1. Objectifs :

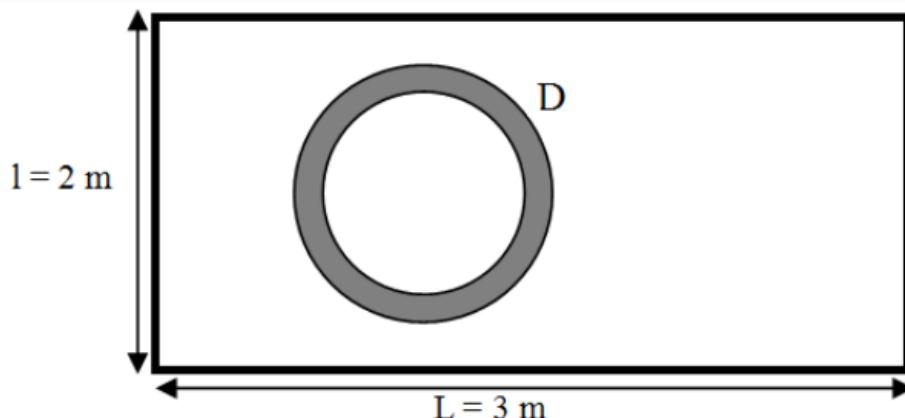
L'objectif global de ce projet est de mener une étude approfondie et de concevoir une éolienne capable de produire une puissance spécifiée. Les objectifs spécifiques énoncés pour ce projet se résument comme suit :

- Réaliser une analyse numérique de la variation de la portance et de la traînée en fonction de divers paramètres tels que la forme du profil, l'angle d'incidence et la vitesse relative (vent/pâle) afin d'optimiser la finesse du profil.
- Concevoir le mât de l'éolienne en tenant compte de la forme, du dimensionnement et du choix des matériaux.
- Effectuer la conception complète de l'éolienne, englobant à la fois les pâles et le mât.
- Vérifier les conditions de fonctionnement de l'éolienne étudiée pour assurer son bon rendement.
- Concevoir et dimensionner la chaîne de transmission, incluant le multiplicateur et l'arbre de transmission.
- Mettre en place un système de gestion du stockage de l'énergie et établir la connexion au réseau pour une intégration efficace.

2. L'écoulement de l'air autours d'un profil de forme 'cercle'

a. Description du problème :

Simulation numérique sous Ansys (fluent, ...) de l'écoulement de l'air autours d'un profil de forme circulaire de diamètre $D = 1 \text{ m}$ son épaisseur $e = 5 \text{ mm}$.



b. Dessiner la géométrie :

Cette étape consiste à dessiner la géométrie du problème avec le logiciel ANSYS DesignModeler.

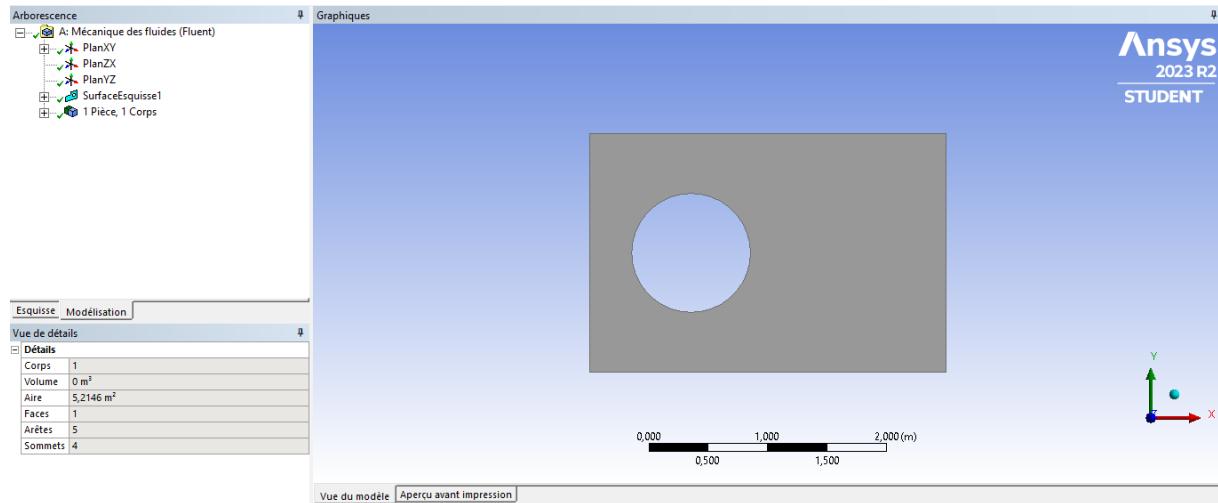


Figure 6 : Dessin de la géométrie.

c. Maillage du domaine fluide :

Comme l'étape précédente est validée, cela ouvre directement le logiciel de maillage ANSYS Meshing et charge la géométrie créée lors de l'étape b.

Tout d'abord on choisit des sélections nommées :

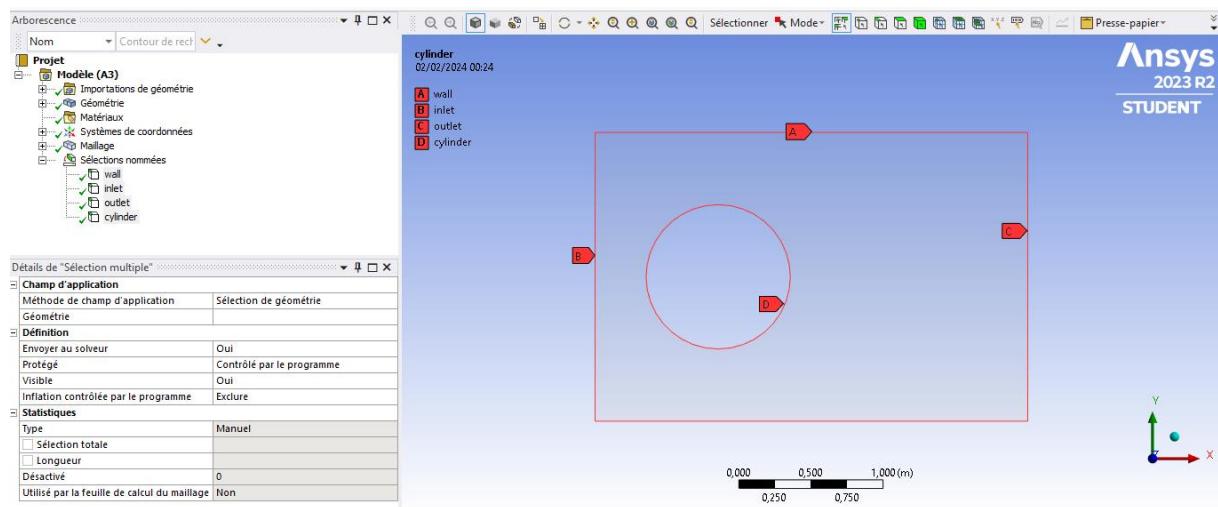


Figure 7 : Introduire les sélections nommées.

Les noms ici ne sont pas choisis au hasard. Ils correspondent aux noms des conditions aux limites dans Fluent. Cela va permettre qu'elles soient reconnues automatiquement comme des entrées, sorties etc ...

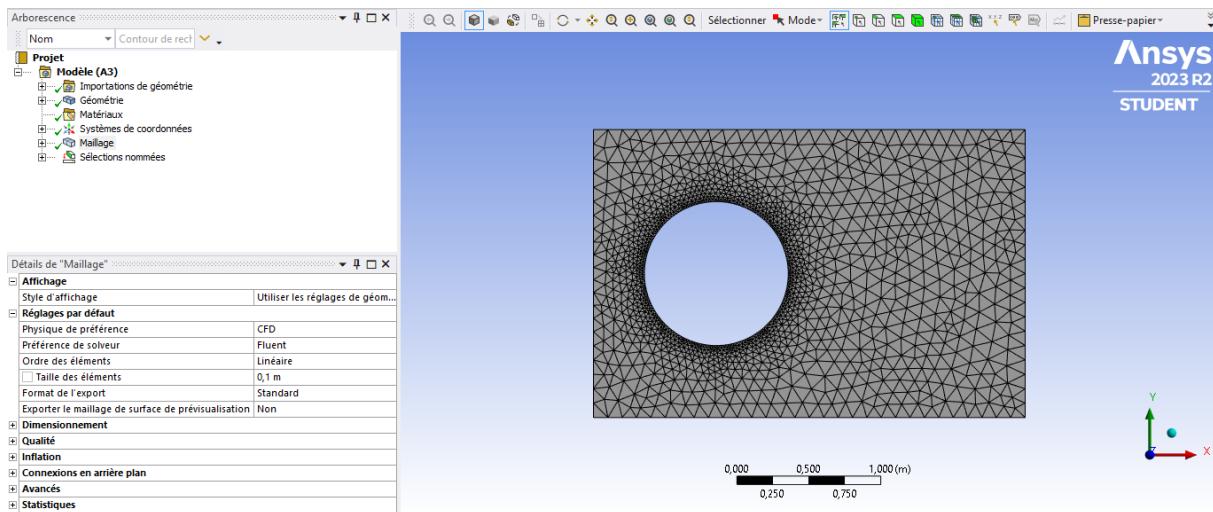
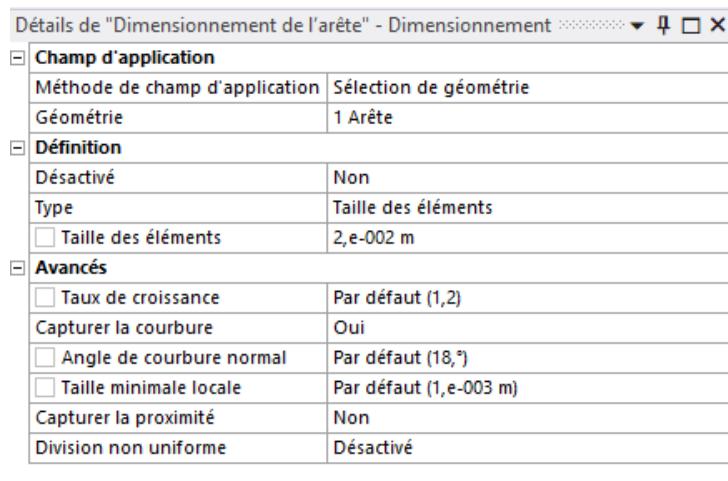


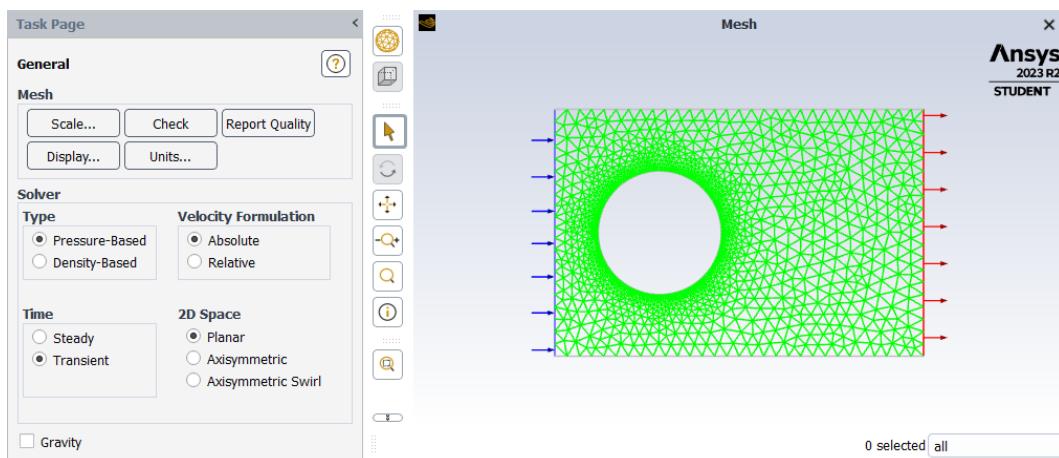
Figure 8 : Maillage du domaine fluide.

On a essayé de raffiner le maillage autour du profil. Il est crucial pour obtenir des résultats précis, en particulier dans les zones où les gradients de pression ou de vitesse sont élevés. On a ajusté les paramètres de raffinement en fonction de l'analyse des résultats du maillage initial.



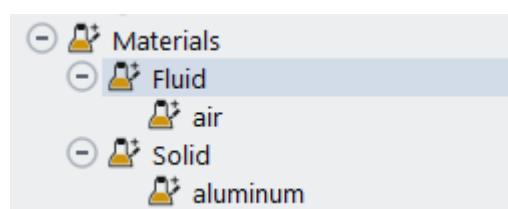
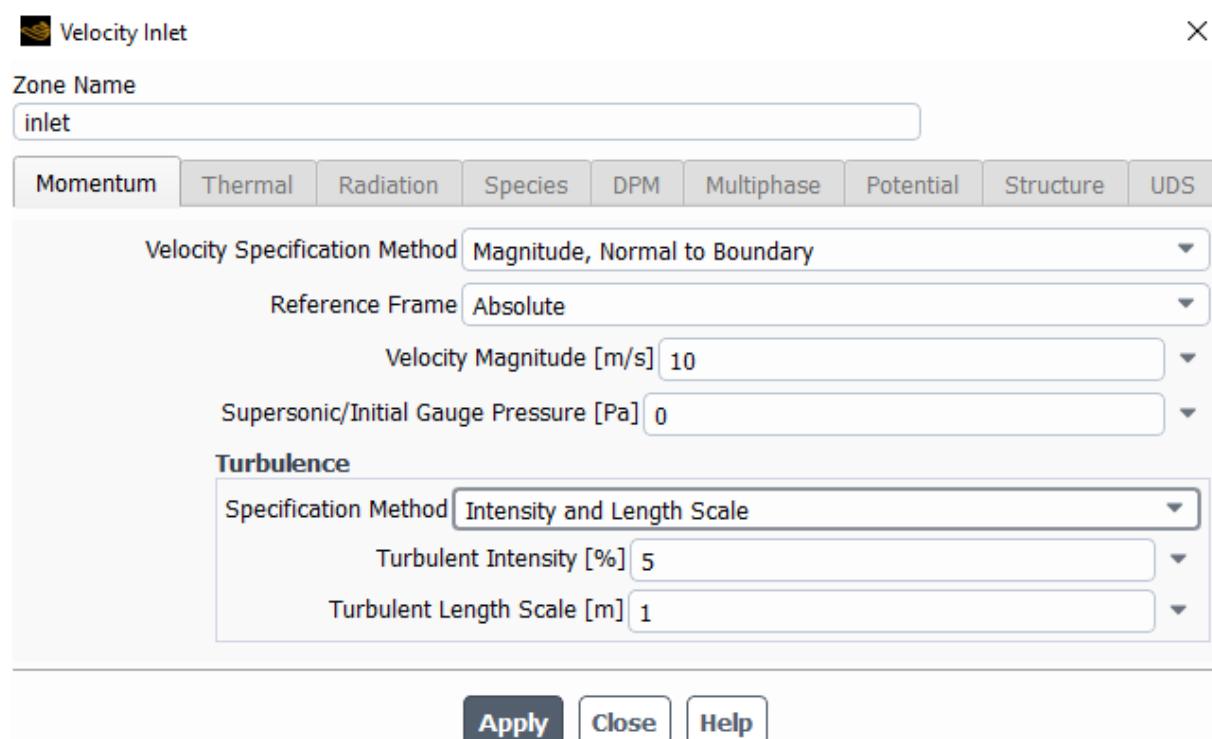
d. Configuration :

De retour dans la fenêtre WorkBench, l'étape de maillage a été actualisée, on peut passer à la suivante qui consiste à mettre en données le problème sous Fluent.



Dans notre cas, les conditions limites sont automatiquement repérées comme des entrées, sorties etc... grâce aux noms qu'on leur a donné dans le logiciel de maillage.

On prend une vitesse d'écoulement de 10 m/s et dans la partie Turbulence, on définit un taux de turbulence en entrée (on prendre ici une valeur faible de 5%) et une échelle de longueur caractéristique (ici 1m = longueur de corde du profil) :



e. Solution :

Solution → Initialisation

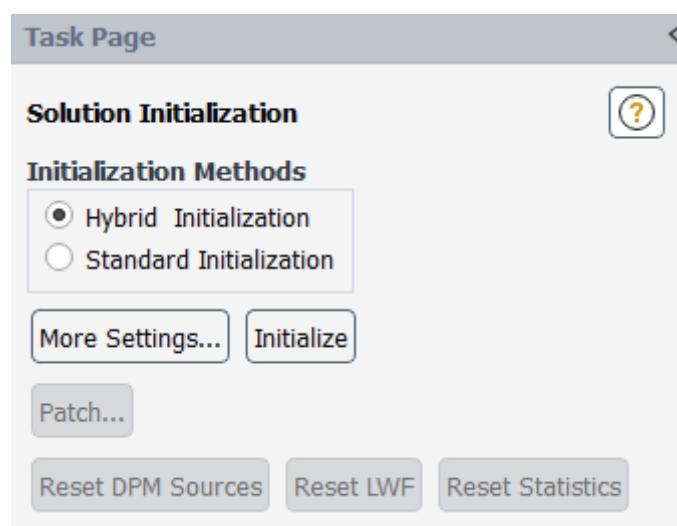
Afin que le calcul puisse démarrer, il lui faut un champ de vitesse initial comme point de départ des itérations.

Le solveur part de la solution initiale et, grâce à un algorithme itératif de résolution du système matriciel obtenu par discrétisation, va effectuer des itérations du problème.

Si tout se passe bien, chaque itération doit modifier la solution courante pour la remplacer par une solution plus proche de la solution exacte recherchée.

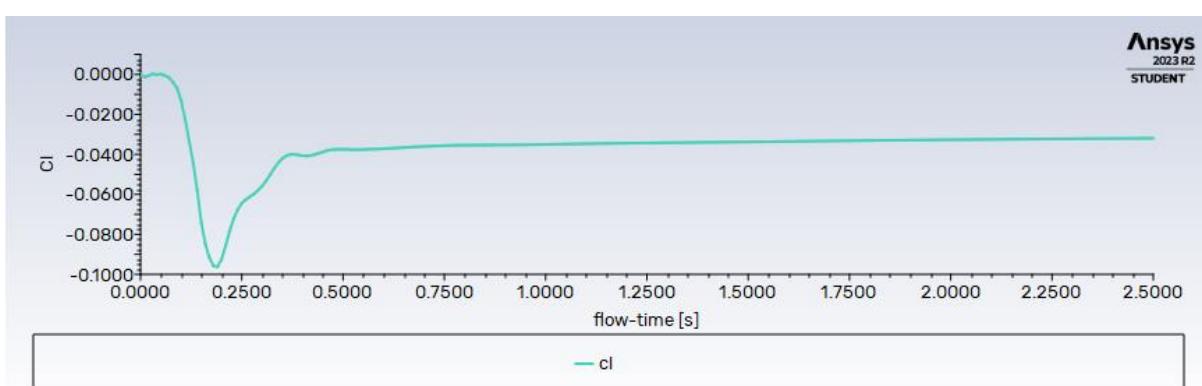
A chaque itération et pour chaque équation une erreur, nommée résidu, est calculé par rapport à une solution exacte du système.

Un calcul diverge si les résidus augmentent au cours des itérations. Il faut alors revoir soit le maillage, soit régler les paramètres du solveur afin de garantir une meilleure convergence.



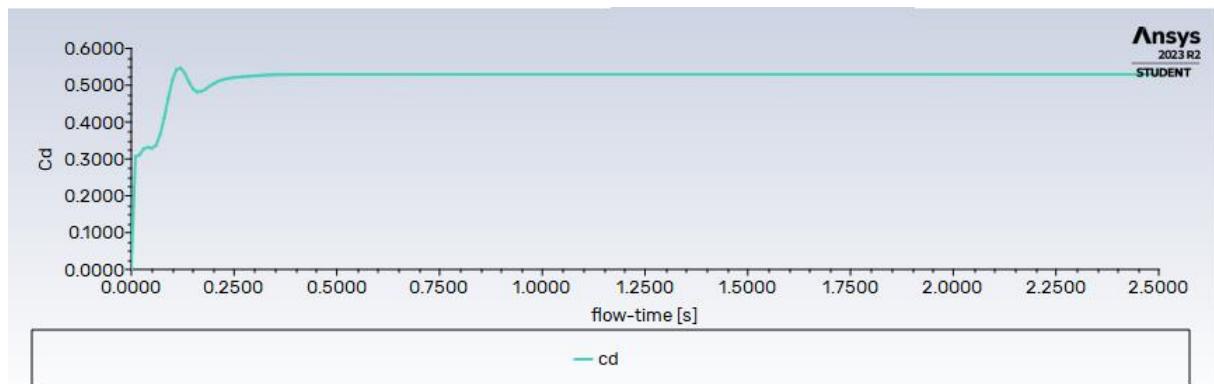
Puis on lance la simulation :

Coefficient de portance C_l :



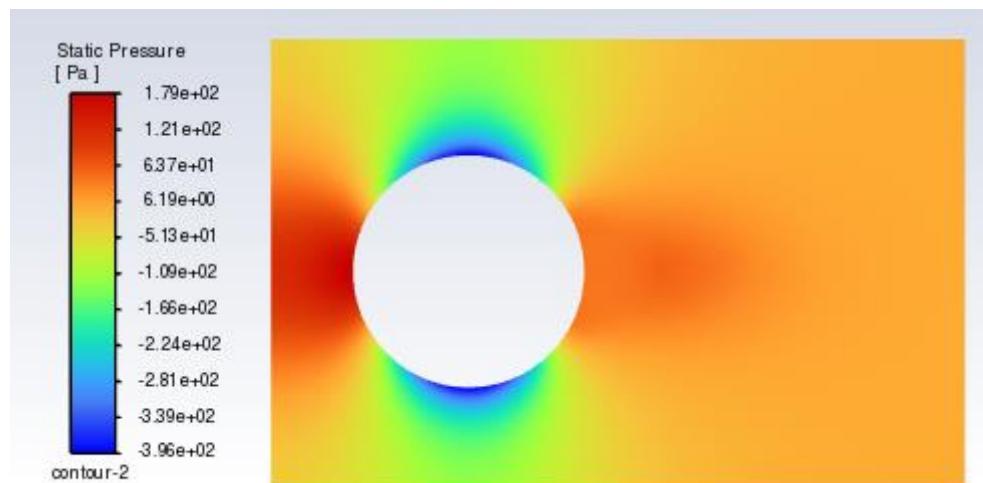
$$C_l = -0.031934095$$

Coefficient de trainée C_d :

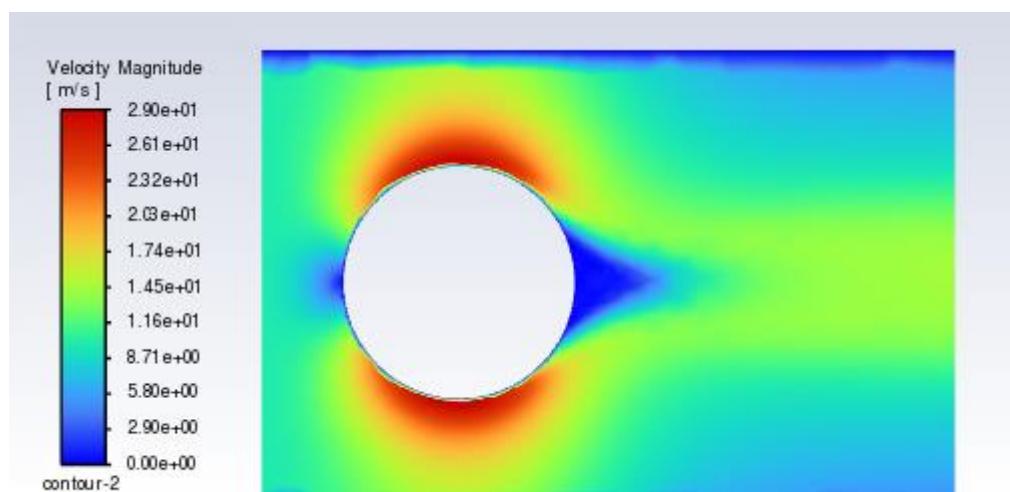


$$C_d = 0.52931046$$

Contours de pression :



Champs de vitesses :



Conclusion :

L'écoulement à fort gradient (pression-vitesse) dans la zone proche paroi entraîne le déplacement vertical du cylindre et par la suite la rotation du rotor tripale.
Le décalage du cylindre par rapport au centre est justifié par l'élimination des effets de bord.

3. L'écoulement de l'air autour d'un profil NACA 2412

a. Importation du profil NACA :

Pour intégrer le profil NACA 2412 dans ANSYS, nous avons suivi une série d'étapes méthodiques, commençant par l'acquisition des données du profil depuis Airfoil Tools.

Puis nous avons extrait la liste des coordonnées des points du profil NACA 2412 à partir du site Airfoil Tools. Ces données sont cruciales pour la définition précise de la forme de l'aile. Les données extraites ont été importées dans Microsoft Excel pour une manipulation facilitée.

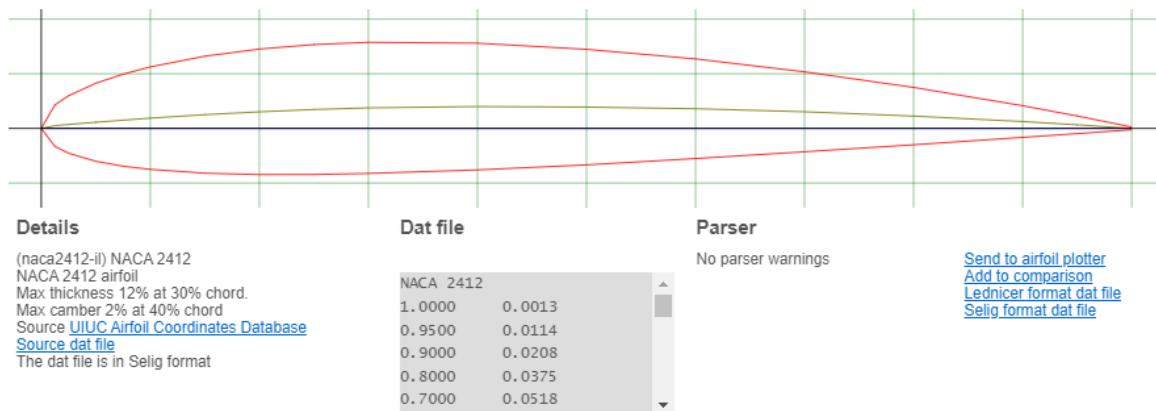


Figure 9 : Courbe du profil NACA 2412.

Les coordonnées modifiées ont ensuite été importées dans CATIA, où nous avons utilisé l'outil approprié pour créer la géométrie du profil NACA 2412. CATIA offre une interface conviviale pour la modélisation, permettant une représentation graphique précise du profil.

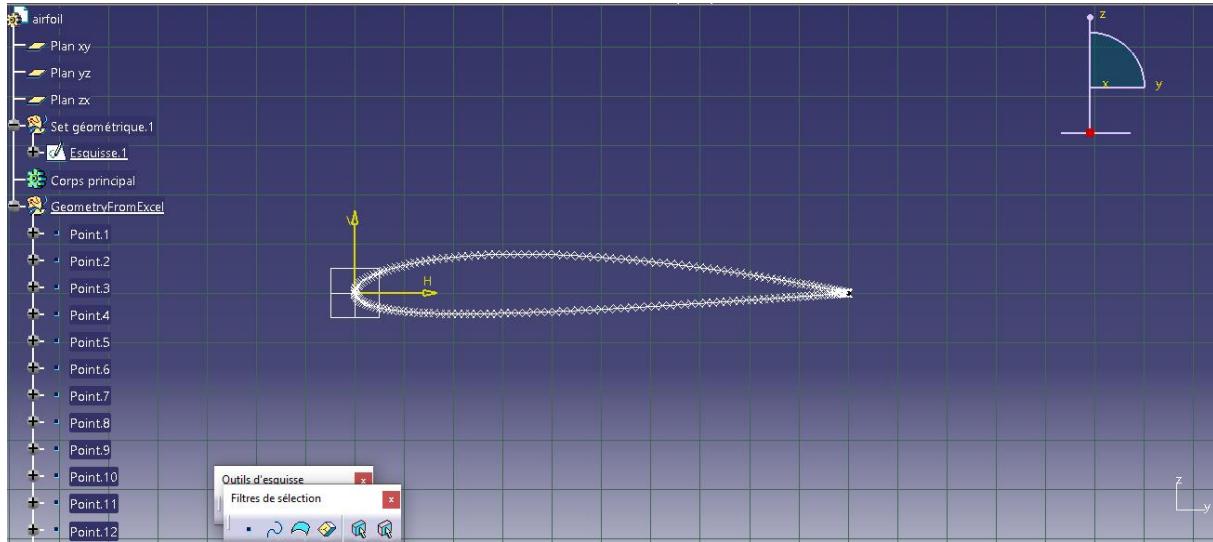
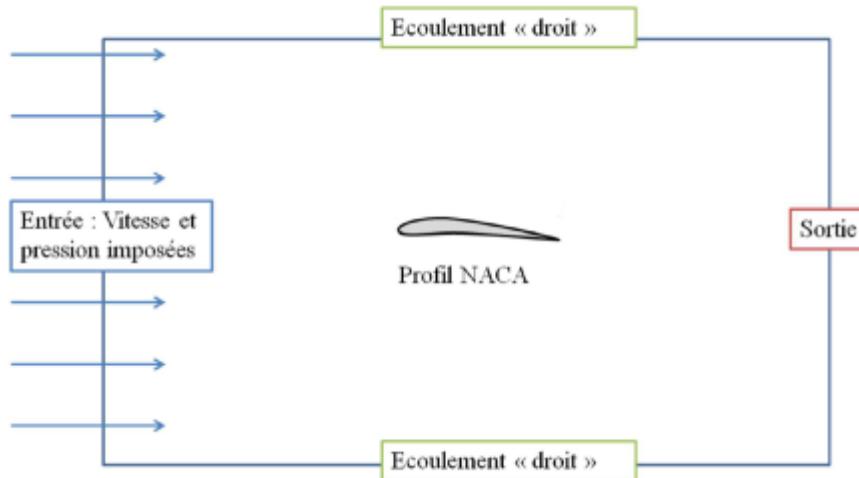


Figure 10 : Dessin du profil NACA 2412 dans le logiciel CATIA V5.

Le profil NACA 2408 a été généré avec succès dans CATIA et après avoir obtenu le profil, nous l'avons intégré dans Workbench ANSYS. Cette plateforme de simulation offre des outils puissants pour l'analyse aérodynamique, permettant de prendre en compte les effets de fluide sur le profil NACA 2412.

b. Description du problème :

On étudie dans ce cas l'écoulement stationnaire 2D autour d'un profil d'aile de type NACA dans un écoulement d'air à une vitesse incidente de 10 m/s.



c. Dessiner la géométrie :

À cette étape, l'objectif est de créer la géométrie du problème en utilisant le logiciel ANSYS DesignModeler.

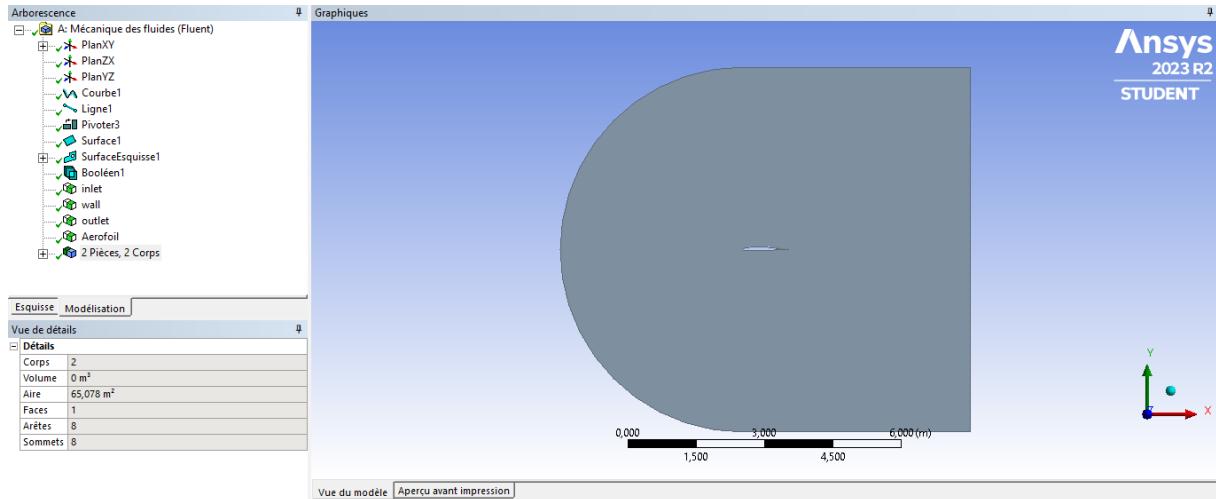


Figure 11 : Dessin de la géométrie.

d. Maillage du domaine fluide :

Après la validation de l'étape précédente, cela conduit à l'ouverture directe du logiciel de maillage ANSYS Meshing et au chargement de la géométrie créée à l'étape précédente.

En premier lieu, des sélections nommées sont effectuées :

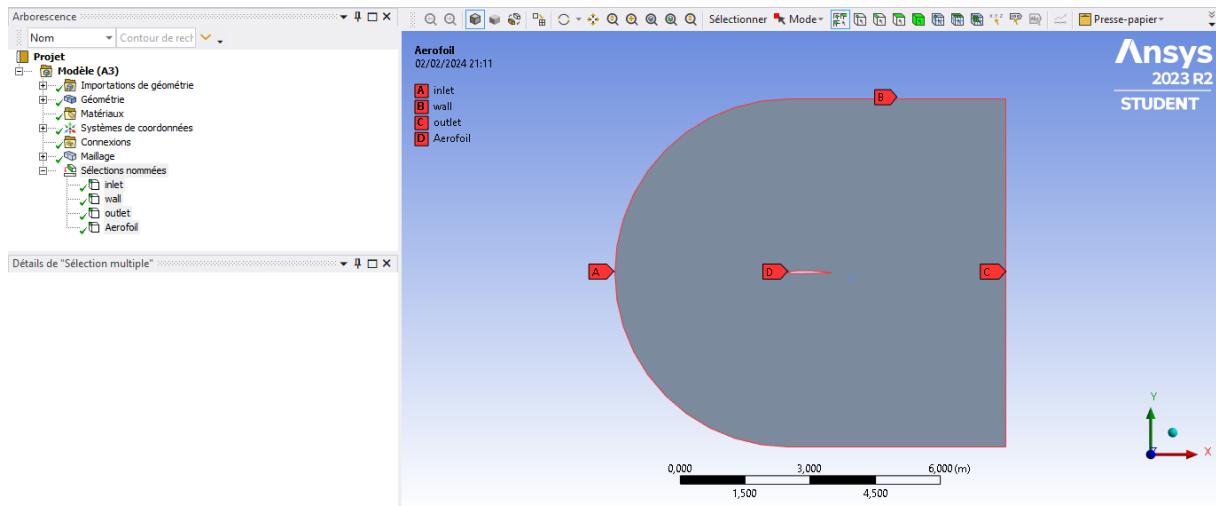


Figure 12 : Introduire les sélections nommées

Nous avons tenté d'améliorer la finesse du maillage autour du profil, ce qui est essentiel pour obtenir des résultats précis, notamment dans les zones où les gradients de pression ou de vitesse sont élevés. Les paramètres de raffinement ont été ajustés en se basant sur l'analyse des résultats du maillage initial.

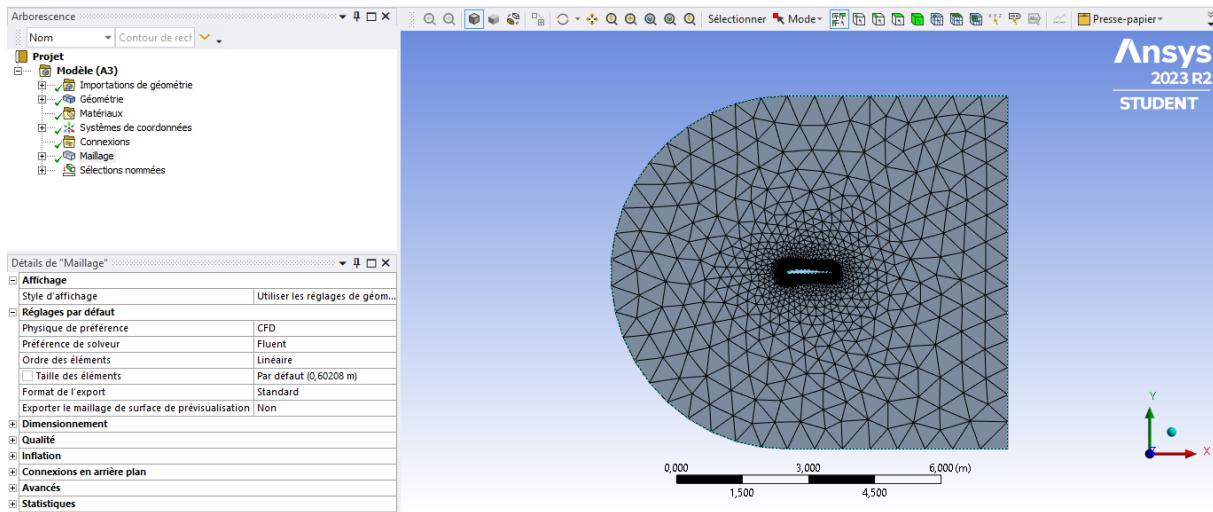


Figure 13 : Maillage raffiné du domaine fluide.

Influence du maillage :

Maillage par défaut :

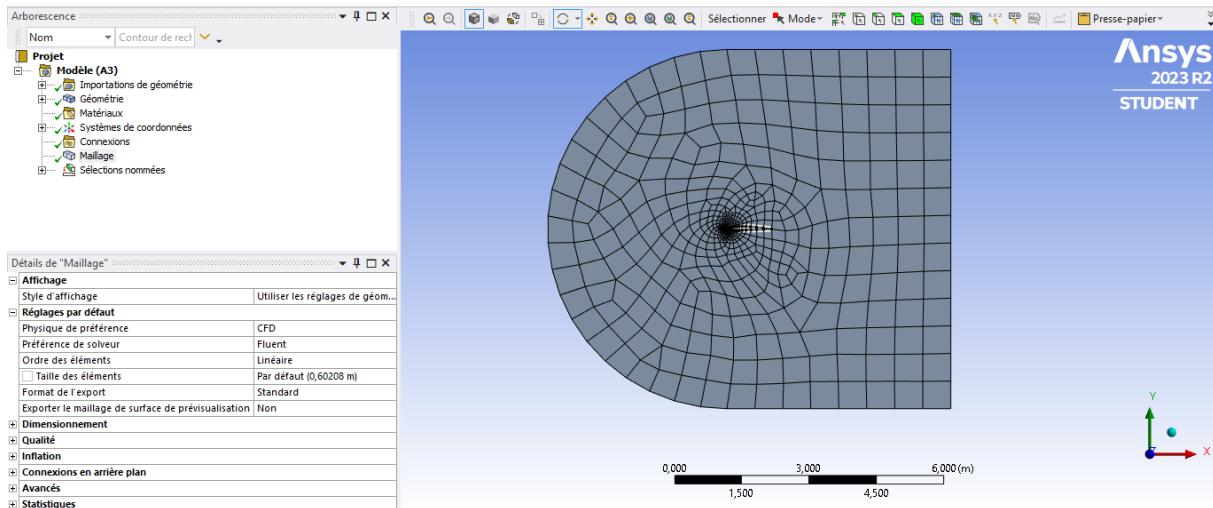


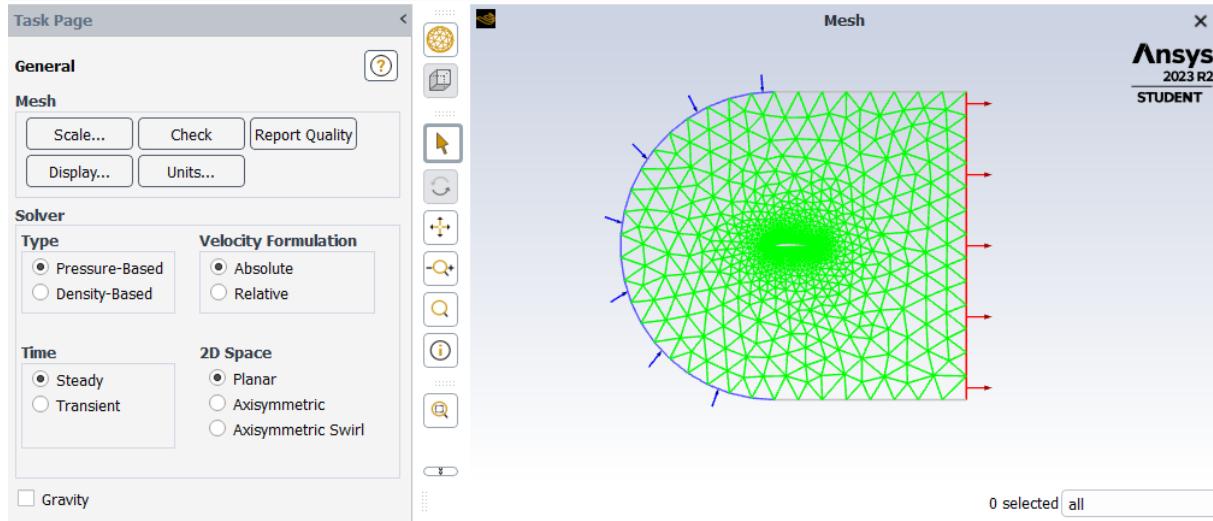
Figure 14 : Maillage par défaut du domaine fluide.

L'influence du maillage sur les résultats de la simulation est cruciale. Un maillage inappropriate peut conduire à des résultats non représentatifs. Il est essentiel de varier la densité du maillage, en particulier près des zones critiques comme le bord d'attaque et le bord de fuite, pour s'assurer d'une capture précise des phénomènes fluides.

En résumé, la qualité du maillage est intrinsèquement liée à la qualité des résultats de la simulation. Une gestion appropriée de la densité du maillage, en particulier dans les zones critiques, garantit une représentation précise des phénomènes fluides et renforce la confiance dans les conclusions tirées de l'analyse aérodynamique. Une approche méticuleuse de la conception du maillage est donc essentielle pour garantir la robustesse et la crédibilité des résultats de la simulation.

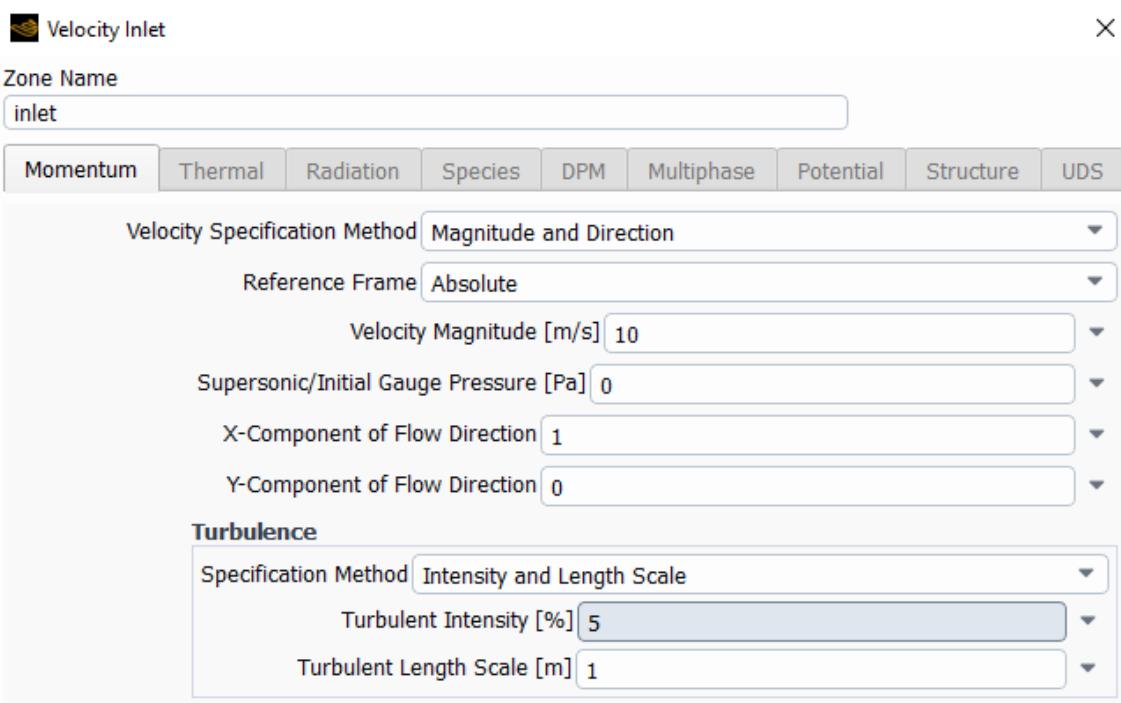
e. Configuration :

De retour dans l'interface WorkBench, l'étape de maillage a été mise à jour, permettant ainsi de passer à la suivante, qui consiste à définir les données du problème dans Fluent.



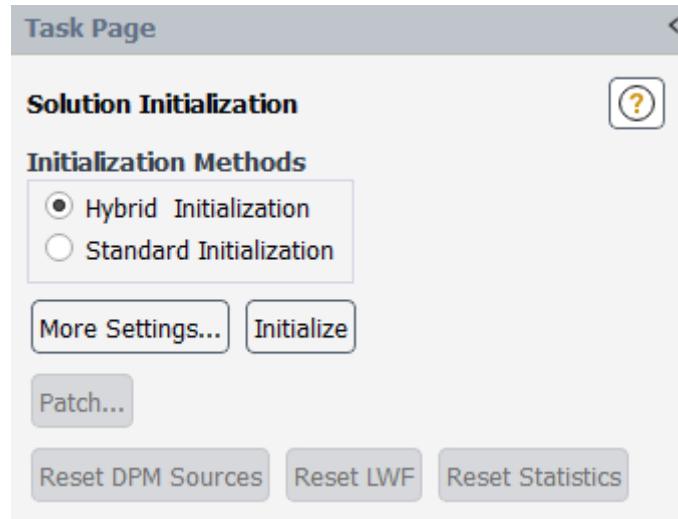
Dans notre configuration, les conditions limites sont identifiées automatiquement en tant qu'entrées ou sorties, grâce aux désignations qui leur ont été attribuées dans le logiciel de maillage.

Nous fixons une vitesse d'écoulement de 10 m/s, puis, dans la section dédiée à la turbulence, nous spécifions un faible taux de turbulence en entrée (ici, 5%) ainsi qu'une échelle de longueur caractéristique (dans ce cas, 1 m correspond à la longueur de corde du profil).



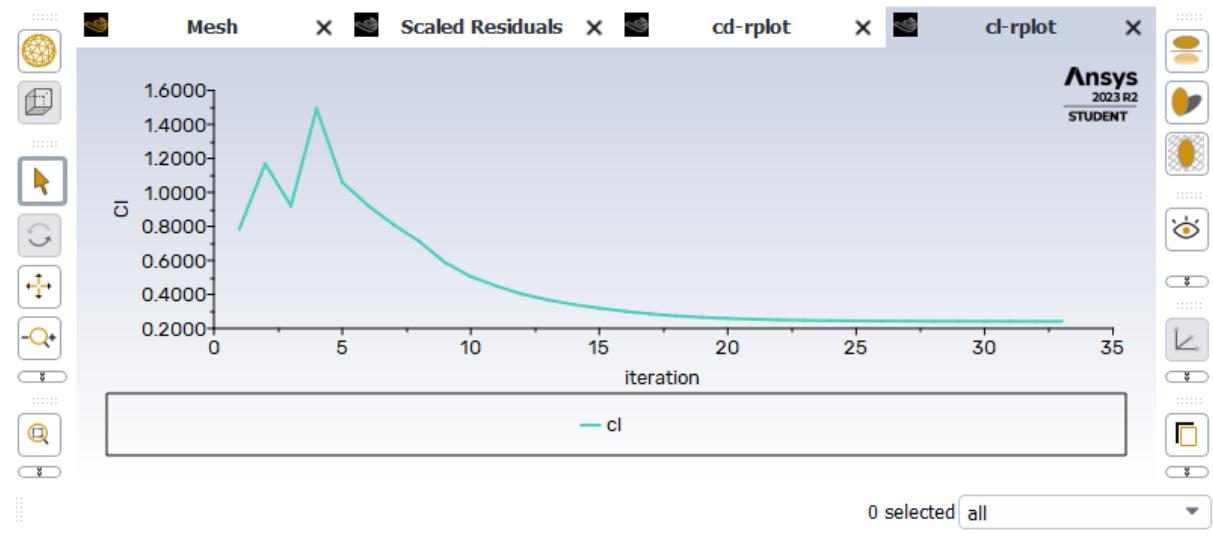
f. Solution :

Après avoir terminé la partie configuration, nous passons à la phase de résolution, en commençant par l'initialisation.



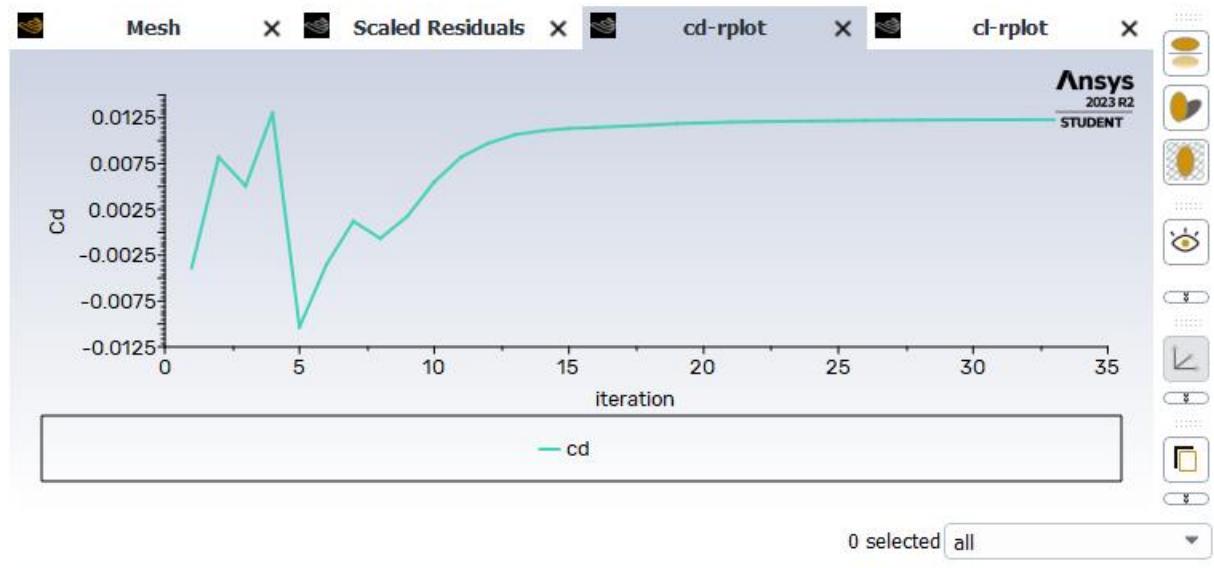
Puis on lance la simulation :

Coefficient de portance C_l :



$$C_l = 0.24116144$$

Coefficient de trainée C_d :



$$C_d = 0.012305198$$

Remarque :

Pour le maillage par défaut, on obtient les valeurs suivantes : $C_l = 0.15239911$ et $C_d = 0.020698303$. On observe donc une différence entre les valeurs obtenues avec le maillage raffiné et celles obtenues avec le maillage par défaut. Le maillage raffiné converge vers la solution exacte de manière plus précise que le maillage par défaut.

Angle d'attaque optimale :

On va fixer $V=10\text{m/s}$ et on va modifier la valeur de l'angle d'attaque

$$V_x = V \cdot \cos(\alpha)$$

$$V_y = V \cdot \sin(\alpha)$$

Avec α : est l'angle d'attaque

α	$V_x(\text{m/s})$	$V_y(\text{m/s})$	C_l	C_d	C_l/C_d
0	10	0	0.24116144	0.012305198	19,59
3	9.986	0,523	0,28501789	0,012755514	22,34
5	9.962	0,871	0,40425216	0,013745146	29,41
6	9.945	1,045	0,4624152	0,014745146	31,36
7	9,925	1,218	0,51827941	0,015658753	33,09
8	9.902	1,391	0,52349878	0,01749504	29,92
12	9.781	2,079	0,67585753	0.041684348	16,24

Figure 15 : Etude de la finesse du profil en fonction de l'angle d'attaque.

La finesse de profil C_l/C_d :

Une caractéristique essentielle d'un profil est sa finesse c'est-à-dire le rapport entre la portance et la traînée qu'il génère. La finesse d'un profil dépend principalement de trois facteurs :

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

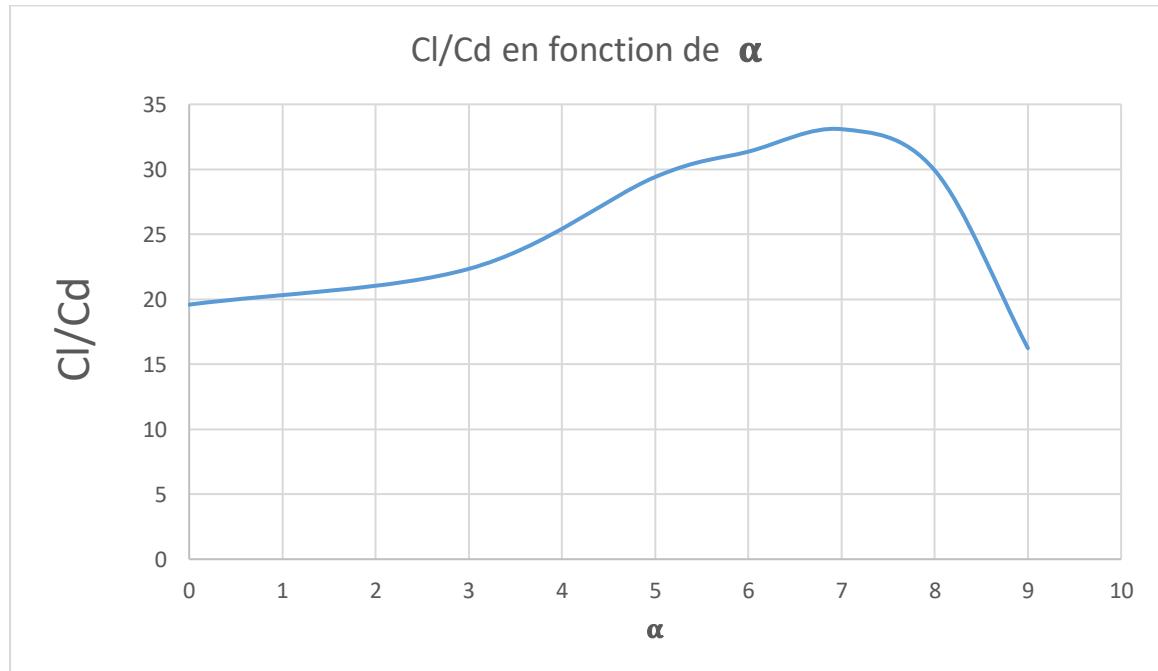


Figure 16 : Courbe Finesse = $f(\alpha)$

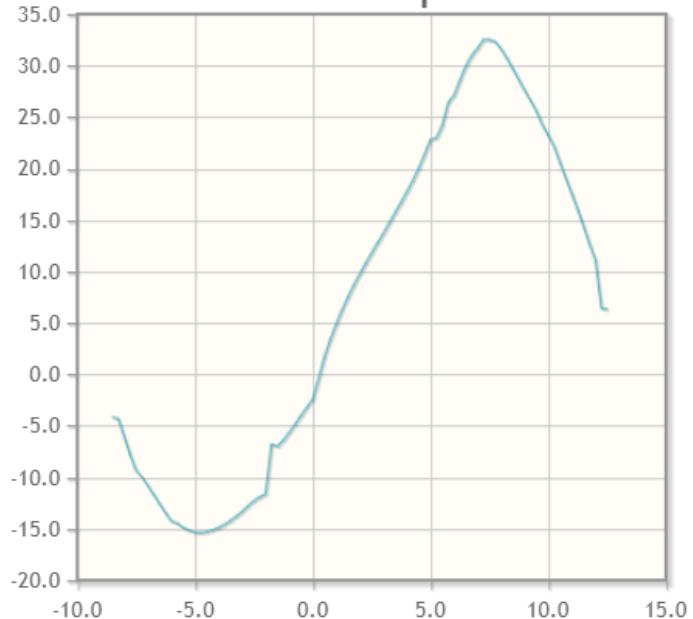
On cherche l'angle d'attaque optimal correspondant à la valeur max de Cl/Cd qui égale à 33,07.

Ainsi on choisit $\alpha=7^\circ$

Comparaison avec les résultats expérimentaux :

Selon le site Airfoil Tools, le graphique de Cl/Cd en fonction de l'angle d'attaque α est le suivant :

Cl/Cd v Alpha



Details

Airfoil: [NACA 2412 \(naca2412-il\)](#)
Reynolds number: 50,000
Max Cl/Cd: 32.54 at $\alpha=7.25^\circ$
Description: Mach=0 Ncrit=9
Source: [Xfoil prediction](#)
Download polar: [xf-naca2412-il-50000.txt](#)
Download as CSV file: [xf-naca2412-il-50000.csv](#)

En comparant, nous trouvons que l'angle d'attaque trouvé par notre simulation est de 7° pour une valeur maximale de finesse de 33,07, tandis que celui du site Airfoil Tools est de $7,35^\circ$ pour une valeur maximale de finesse de 32,54.

L'écart entre la valeur de l'angle d'attaque trouvée par simulation et celle trouvée sur le site Airfoil Tools peut s'expliquer par plusieurs raisons : La précision des modèles numériques utilisés dans la simulation ainsi que les méthodes numériques de résolution peuvent influencer les résultats. Des différences dans la précision des calculs ou dans les approximations numériques peuvent entraîner des écarts dans les valeurs obtenues.

L'effet de la variation de la vitesse du vent.

Dans le domaine de l'énergie éolienne, la compréhension de l'effet de la variation de la vitesse du vent est essentielle pour optimiser la conception et les performances des éoliennes. Parmi les nombreux facteurs à considérer, les coefficients de portance (Cl) et de traînée (Cd) jouent un rôle crucial. Ces coefficients, qui dépendent étroitement de la vitesse du vent, influencent directement la production d'énergie et l'efficacité des éoliennes. Cette introduction se penchera sur l'impact de la variation de la vitesse du vent sur les calculs des éoliennes, en mettant en lumière l'importance des coefficients Cl et Cd.

Ces données représentent les valeurs des coefficients de portance (Cl) et de traînée (Cd) pour différentes vitesses du vent, exprimées en mètres par seconde (m/s). Voici un aperçu des valeurs :

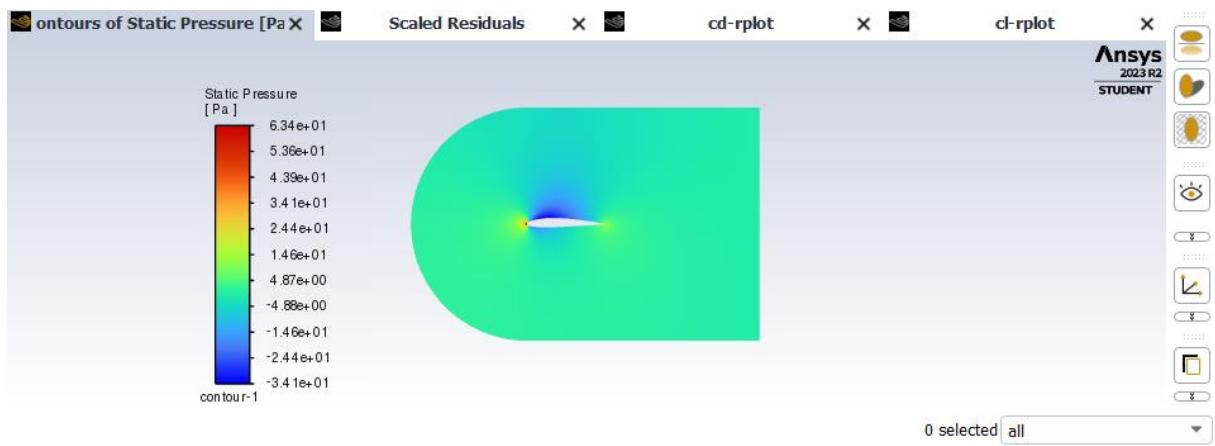
Vitesse (m/s)	Cl	Cd	Cl/Cd
10	0.24116144	0.012305198	19,59
15	0.23644868	0.014598168	16,19
20	0.42122656	0.024960389	16,87
25	0.65985152	0.037783085	17,63

Figure 17 : Etude de l'effet de la variation de la vitesse du vent sur la finesse.

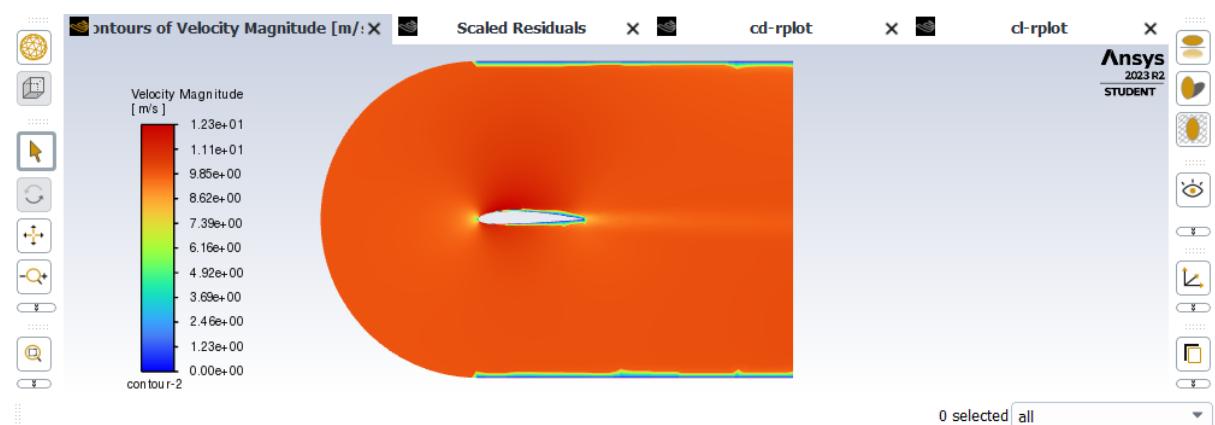
Ces valeurs illustrent comment les coefficients Cl et Cd changent en fonction de la vitesse du vent. On peut observer que généralement, à mesure que la vitesse du vent augmente, le coefficient de portance tend à augmenter tandis que le coefficient de traînée augmente également, bien que souvent à un taux légèrement plus lent.

Ces données sont cruciales pour modéliser et comprendre le comportement des éoliennes dans différentes conditions de vent, ce qui est essentiel pour optimiser leur conception et leur efficacité énergétique.

Contours de pression :



Champs de vitesses :



4. Simulation de la pâle en 3D

a. Dessiner la géométrie :

Importation du CAO du profil NACA 2412 sur Design Modeler et création du domaine fluide.

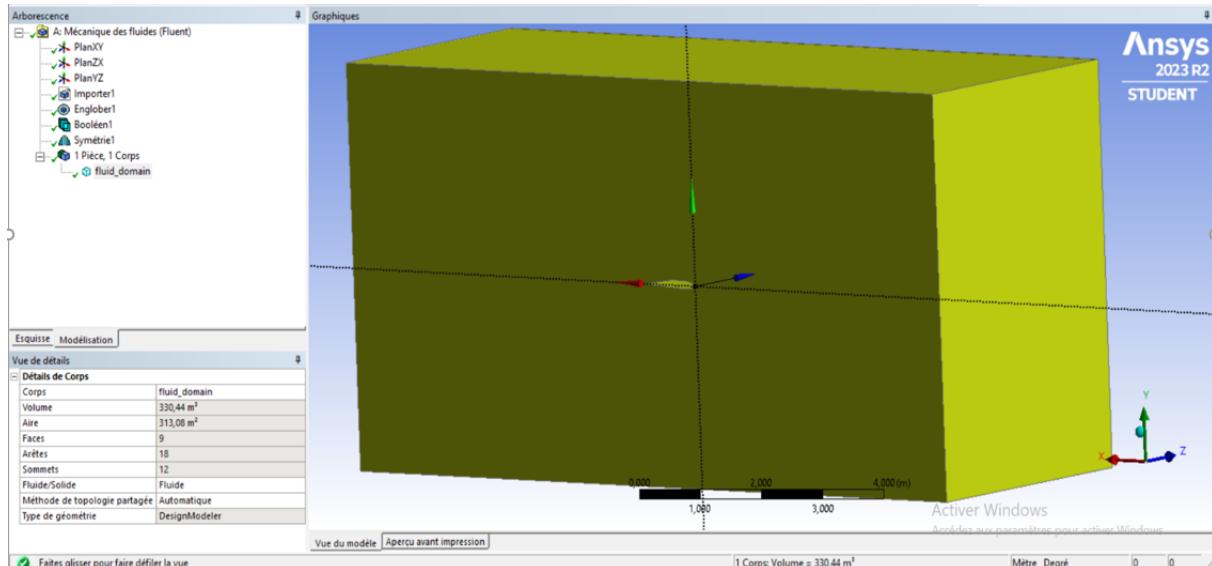


Figure 18 : Dessin de la géométrie.

b. Maillage du domaine fluide :

Après avoir validé l'étape précédente, le processus s'enchaîne automatiquement en lançant le logiciel de maillage ANSYS Meshing et en chargeant la géométrie qui a été créée à l'étape précédente.

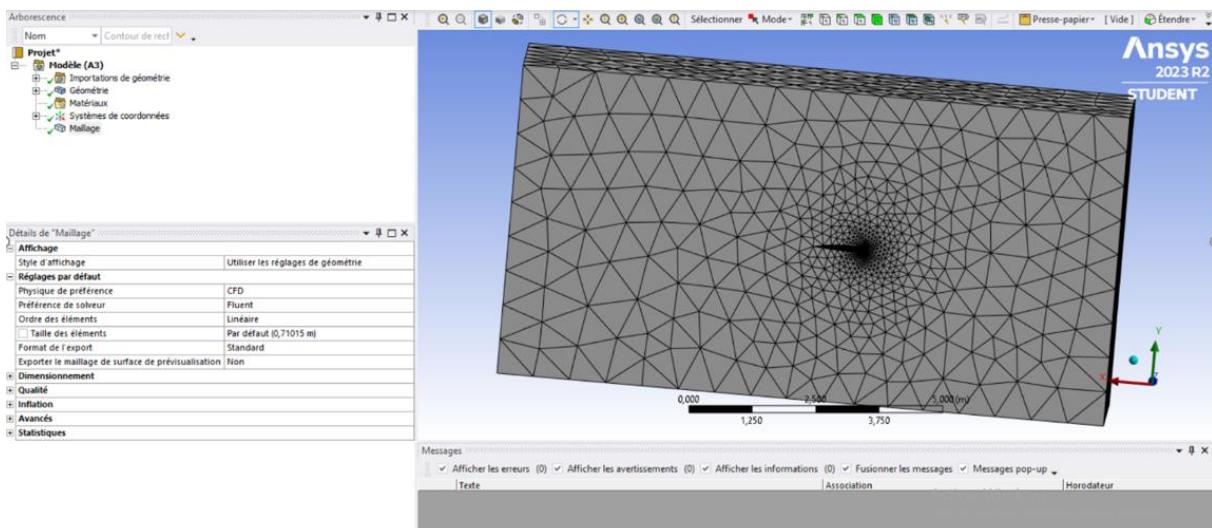


Figure 19 : Maillage raffiné du domaine fluide.

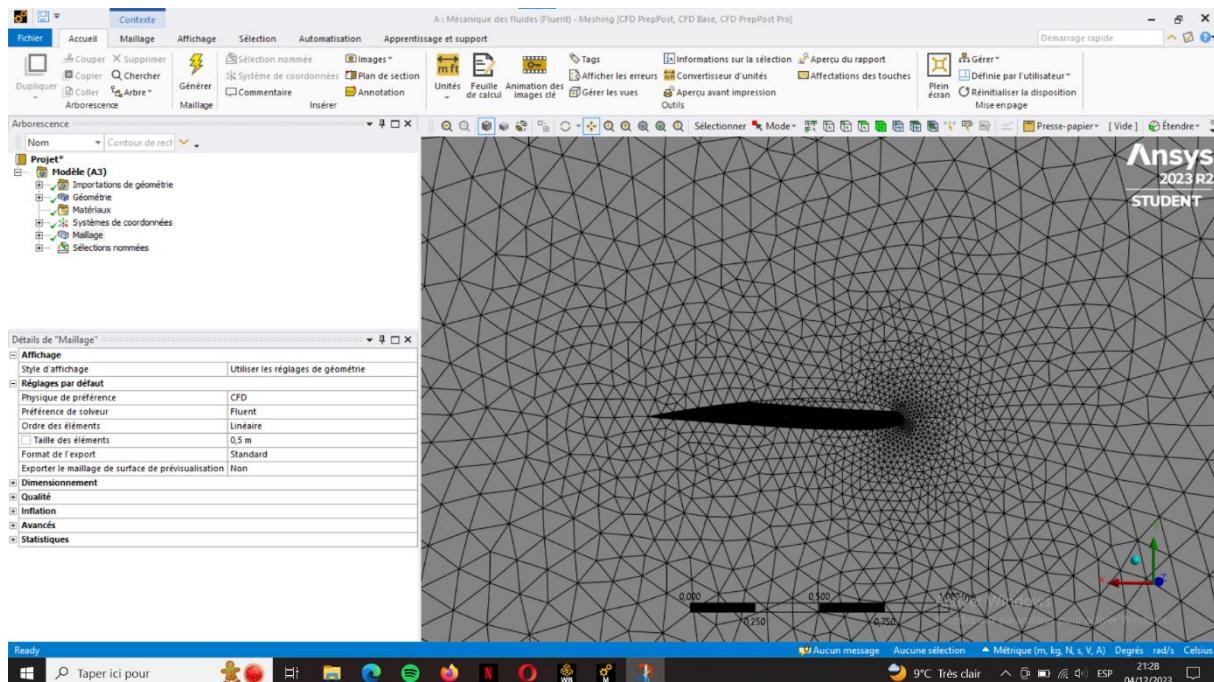
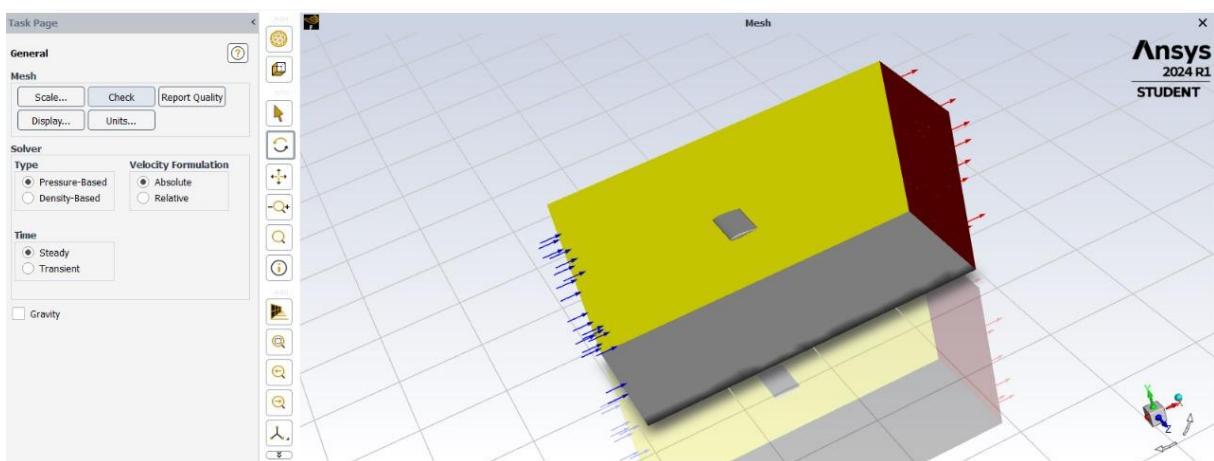


Figure 20 : Maillage raffiné dans la zone fort gradient.

c. Configuration :

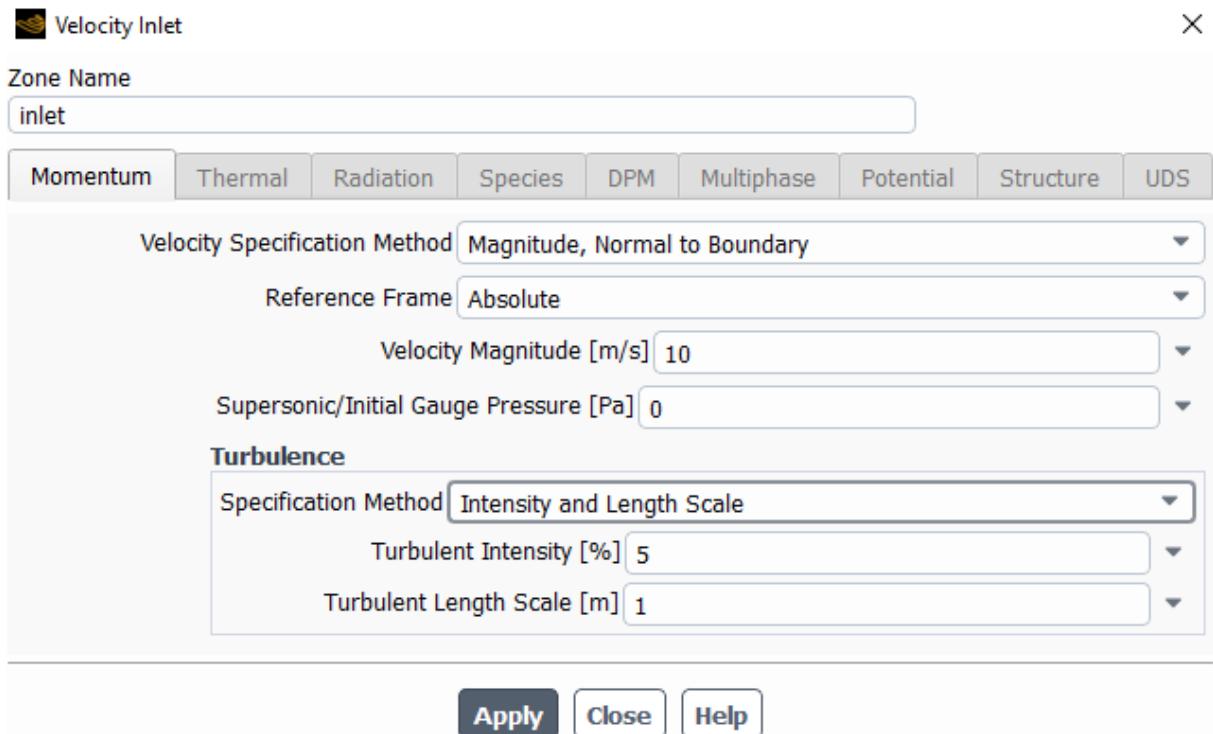
De retour dans l'interface Workbench, l'étape de maillage a été automatiquement mise à jour, ce qui permet de passer à l'étape suivante, consistant à définir les paramètres du problème dans Fluent.



Dans notre cas, les conditions limites sont automatiquement repérées comme des entrées, sorties etc... grâce aux noms qu'on leur a donné dans le logiciel de maillage.

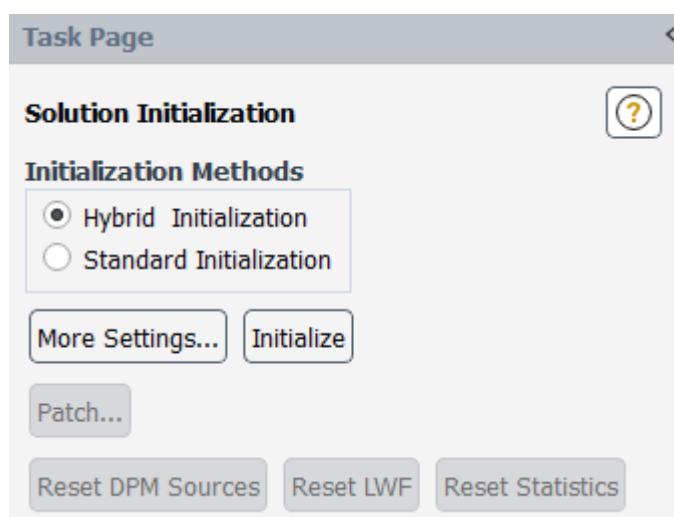
On prend une vitesse d'écoulement de 10 m/s et dans la partie Turbulence, on définit un

taux de turbulence en entrée (on prendre ici une valeur faible de 5%) et une échelle de longueur caractéristique (ici 1m = longueur de corde du profil) :

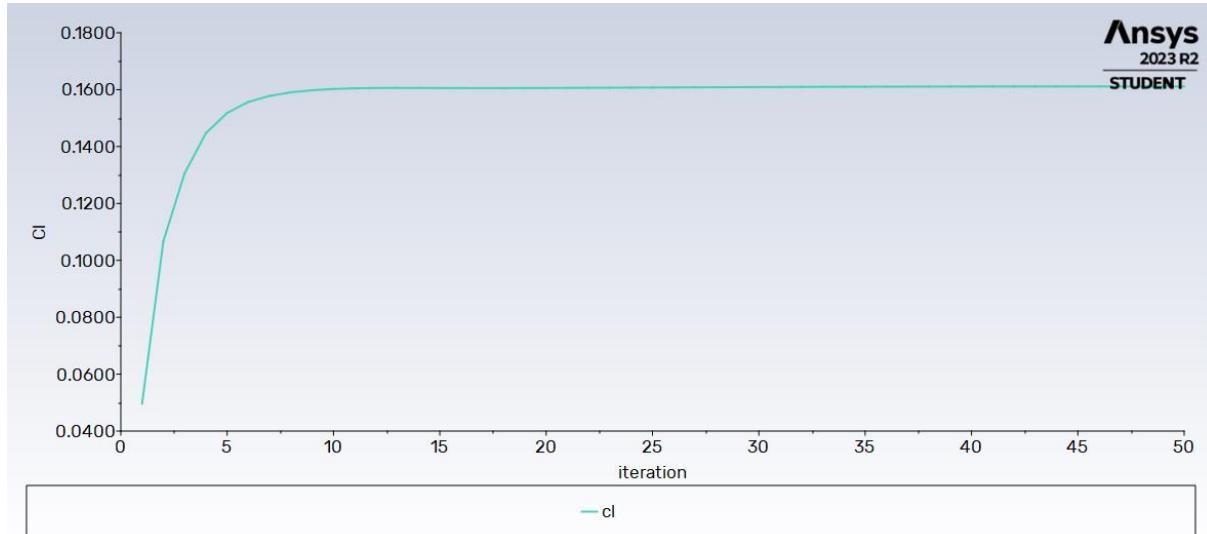


d. Solution :

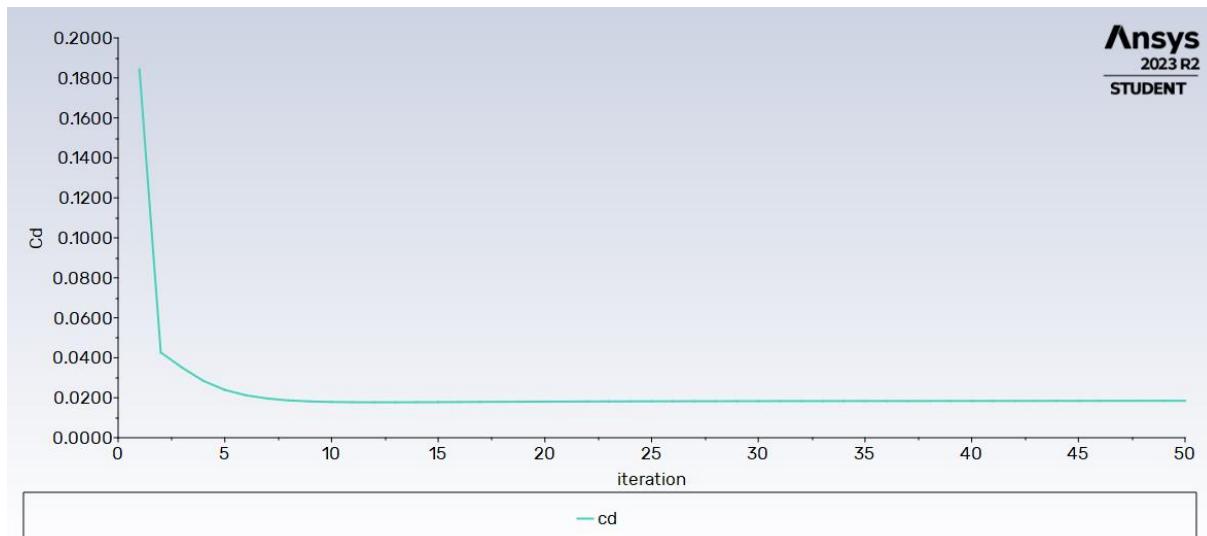
Pour commencer le processus de calcul, il est nécessaire d'avoir un champ de vitesse initial comme point de départ des itérations. Le solveur utilise cette solution initiale et, à l'aide d'un algorithme itératif de résolution du système matriciel résultant de la discréttisation, effectue des itérations pour résoudre le problème. Idéalement, chaque itération devrait raffiner la solution courante pour se rapprocher davantage de la solution exacte recherchée. À chaque itération et pour chaque équation, une mesure d'erreur, appelée résidu, est calculée par rapport à une solution exacte du système. Si les résidus augmentent au cours des itérations, cela indique une divergence dans le calcul. Dans ce cas, il est nécessaire de revoir soit le maillage, soit d'ajuster les paramètres du solveur pour assurer une meilleure convergence.



Coefficient de portance C_l :



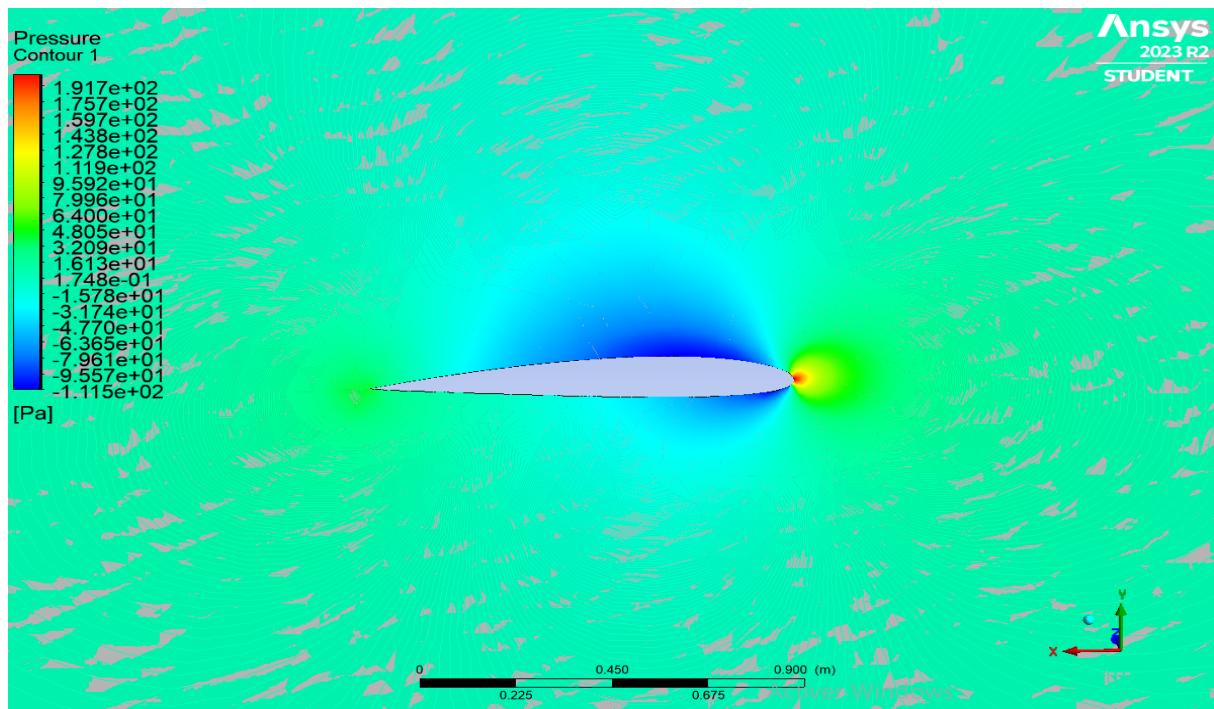
Coefficient de portance C_d :



Donc : $C_d = 0,02$ et $C_l = 0,16$

D'après les résultats on constate que les deux coefficients convergent. Ceci est justifié aussi par la diminution des redus de calcul.

Contours de pression :



Conclusion :

Chapitre 3 : Partie structure

1. Calcul d'épaisseur du mat

a. Calcul analytique :

Dans ce chapitre, on va faire l'étude statique et dynamique du mât de notre éolienne pour ce faire, on doit connaître les caractéristiques de l'éolienne et les forces appliquées sur le mât.

Les différentes charges appliquées sur le mât : Le mât est soumis au poids P du rotor et de la nacelle, la force de poussé F du rotor et la charge du vent. Le mât est considéré comme une poutre encastrée conique, pour la sécurité on doit considérer le cas le plus défavorable.

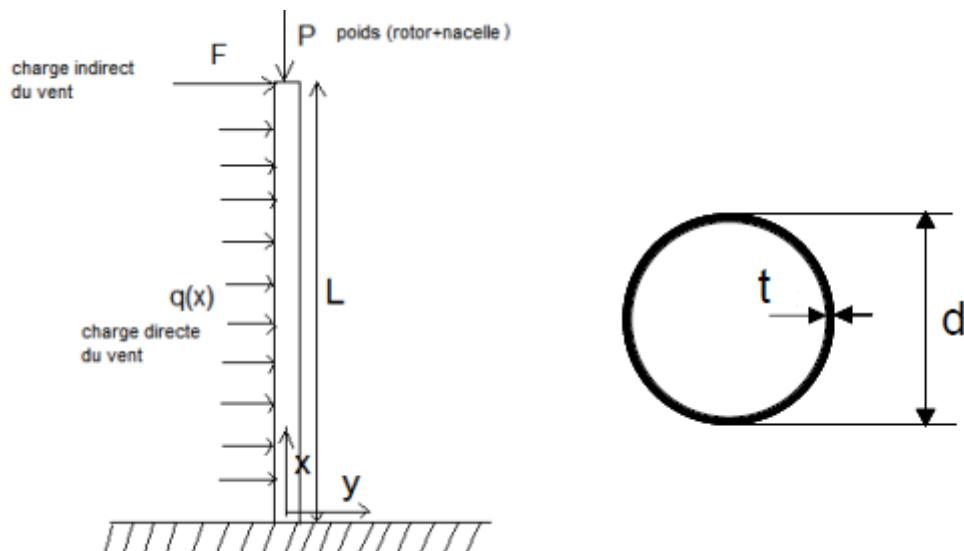


Figure 21 : Les différentes charges appliquées sur le mât.

Les dimensions du cône sont telles que :

- $D_1 = 3,5 \text{ m}$: Diamètre extérieur de base du cône.
- $D_2 = 1,75 \text{ m}$: Diamètre extérieur du sommet du cône
- $L = 55 \text{ m}$: Hauteur du mât

Charges appliquées sur le mât :

- Effort exercé par le rotor sur le mât : $P_R = 160 \text{ KN}$
- Effort exercé par la nacelle sur le mât : $P_N = 230 \text{ KN}$
- Force du vent appliquée sur le rotor et nacelle : $F = 850 \text{ KN}$
- Force du vent appliquée sur la surface latérale du mât : $F_q = 200 \text{ KN}$

Calcul de la charge critique d'Euler :

Déterminer le module de Young (E) d'acier inoxydable :

Selon les propriétés mécaniques de l'acier inoxydable, le module de Young typique est d'environ 210 GPa.

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 * E * I}{L^2}$$

E : est le module de Young du matériau.

I : est le moment d'inertie de la section transversale du mât.

L : est la longueur effective du mât.

Avec $I = \frac{\pi}{64}(D_1^4 + D_2^4 - D_1^2 * D_2^2)$

Remplaçons les valeurs : $D_1 = 3,5\text{m}$ et $D_2 = 1,75\text{m}$

On trouve $I=5,98\text{ m}^4$

On a $E=210\text{ GPA}$ et $L=55\text{m}$

On trouve $P_{cr} = 4,09 * 10^6\text{ N}$

Moments fléchissant :

Les moments fléchissant résultent des charges appliquées sur le mât. Pour un mât conique, ces moments varieront le long de la hauteur. Nous devons calculer ces moments à différents points du mât.

Moment fléchissant dû à la force du vent appliquée sur le rotor et la nacelle (F) :

Le moment fléchissant à une distance x du bas du mât est donné par :

- $M_F = F * L$
- $M_F = 850 * 10^3 * 55$
- $M_F = 46,75 * 10^6\text{ N.m}$

Moment fléchissant dû à la force du vent appliquée sur la surface latérale du mât (F_q) :

Comme cette force est uniformément répartie sur toute la surface latérale, le moment fléchissant est constant sur toute la hauteur du mât :

- $M_{Fq} = F_q * \frac{L}{2}$
- $M_{Fq} = 200 * 55$
- $M_{Fq} = 5,5 * 10^6\text{ N.m}$

10^3

Forces de compression :

Force de compression due à l'effort exercé par le rotor sur le mât (P_R) :

$$-F_R = P_R = 160 \text{ KN} = 160 * 10^3 \text{ N}$$

Force de compression due à l'effort exercé par la nacelle sur le mât (PN) :

$$-F_N = P_N = 230 \text{ KN} = 230 * 10^3 \text{ N}$$

Maintenant, nous devons calculer les contraintes maximales à la base du mât. Nous allons utiliser les équations de flexion et de compression appropriées pour une structure conique. Supposons que la base du mât soit la zone la plus critique pour les contraintes.

Une fois que nous avons ces contraintes maximales, nous les comparerons à la limite de résistance de l'aluminium pour garantir la sécurité de la structure.

La contrainte de flexion maximale σ_{flex} se produit à la surface extérieure de la section transversale du mât à la base. Elle est causée par les moments fléchissant calculés précédemment.

La contrainte de flexion maximale peut être calculée en utilisant la formule suivante pour une poutre conique :

$$-\sigma_{flex} = \frac{M}{S}$$

Où :

M est le moment fléchissant,

S est le moment statique de la section transversale.

Le moment statique (S) pour une section transversale conique est donné par :

$$-S = \frac{\pi}{32} (D_1^3 - D_2^3)$$

$$-S = 3,68 \text{ m}^3$$

Contraintes de compression :

La contrainte de compression maximale (σ_{comp}) se produit à la surface extérieure de la section transversale du mât à la base. Elle est causée par les forces de compression calculées précédemment.

La contrainte de compression maximale peut être calculée en utilisant la formule suivante pour une colonne conique :

$$-\sigma_{comp} = \frac{F}{A}$$

Où :

F est la force de compression,

A est la section transversale.

La section transversale A pour une section conique est donnée par :

$$A = \frac{\pi}{4} (D_1^2 - D_2^2)$$

$$A = 7,21 \text{ m}^2$$

Calcul des contraintes maximales :

Contrainte de flexion maximale σ_{flex} :

$$\sigma_{flex} = \frac{M_F + M_{Fq}}{S}$$

$$\sigma_{flex} = 14,2 \text{ MPa}$$

Contrainte de compression maximale σ_{comp} :

$$\sigma_{comp} = \frac{F_N + F_R + P_m}{A}$$

$$\sigma_{comp} = 0,054 \text{ MPa}$$

Comme la contrainte de flexion maximale ne dépasse pas la limite de résistance de l'acier inoxydable, il est donc nécessaire de vérifier la condition de résistance du matériau.

On a $\sigma_{flex} < \frac{R_e}{s}$ avec $s=1,5$ et $R_e = 250 \text{ MPa}$

Cependant, pour calculer l'épaisseur minimale requise, nous devons prendre en compte la contrainte la plus élevée, qui est la contrainte de flexion maximale.

$$\text{Donc } e = \frac{\sigma_{flex} * s}{M_{Fq} + M_F} = 48,37 \text{ mm}$$

D'où on prend une épaisseur de 50 mm.

b. Calcul numérique :

Commençons par dessiner le modèle numérique du mât dans DesignModeler.

L'épaisseur choisie est : **e=40mm**

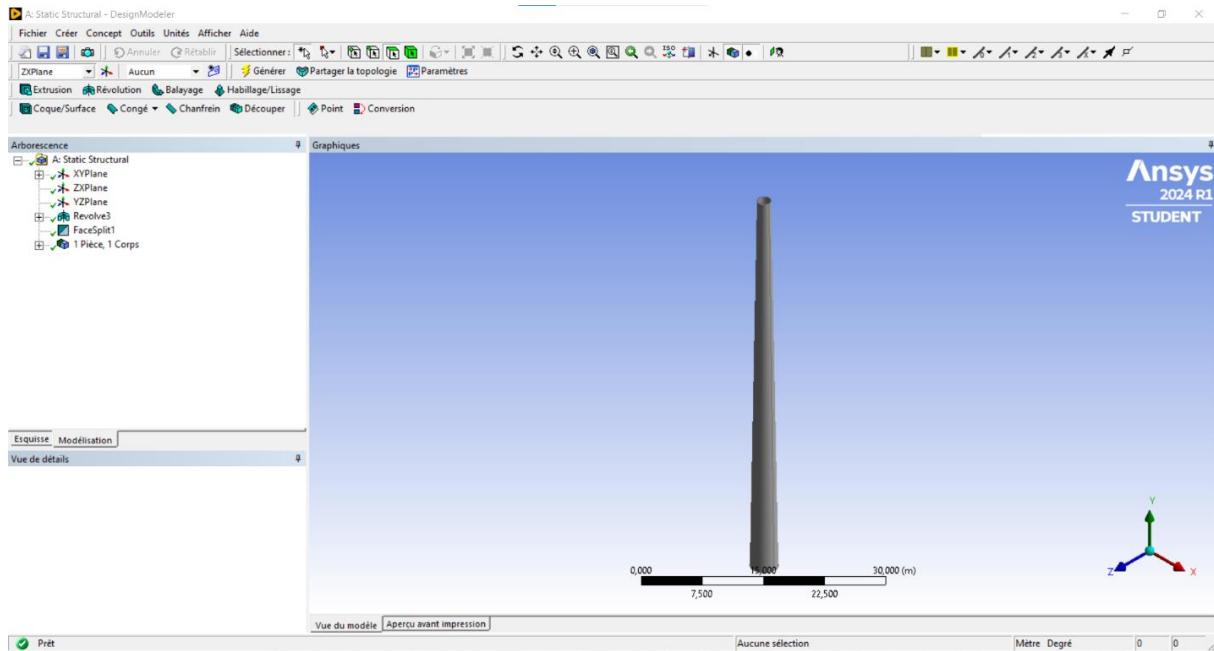


Figure 22 : CAD du mât.

Ensuite on passe appliquer les différentes forces sur le mât et définir la condition de liaison (encastrement). Pour déterminer la force linéique appliquée par le vent sur la surface latérale, on doit diviser F_q par la hauteur du Force du vent appliquée sur la surface latérale du mât. Ainsi on trouve **$F_q=3636.36 \text{ N/m}$**

Champ de déformation :

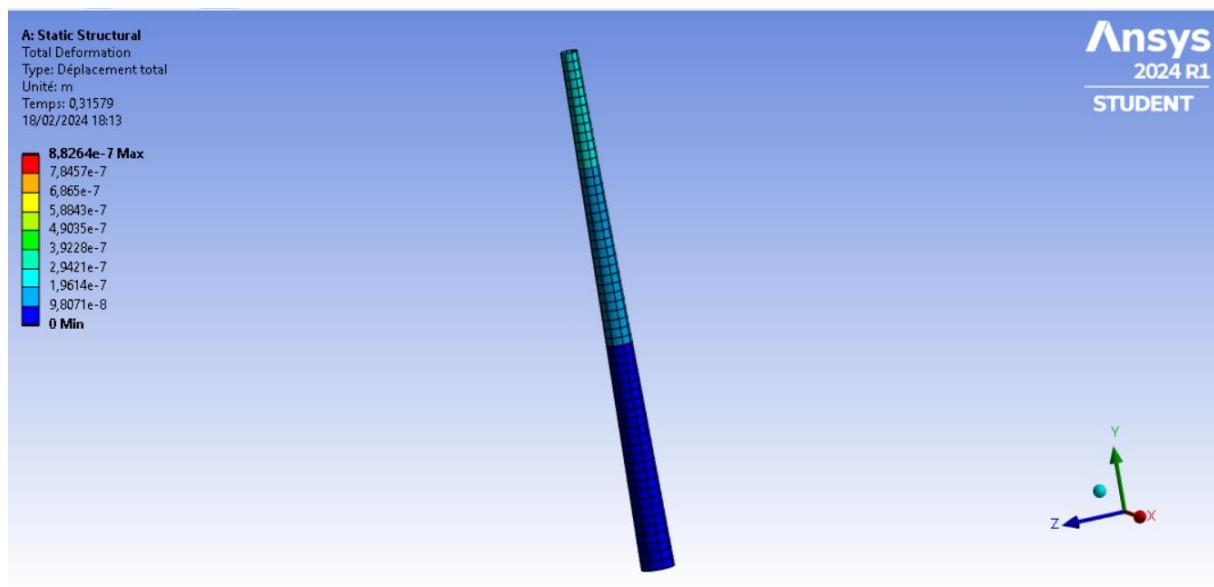


Figure 23 : Déformations totales du mât.

Champ de contraintes :

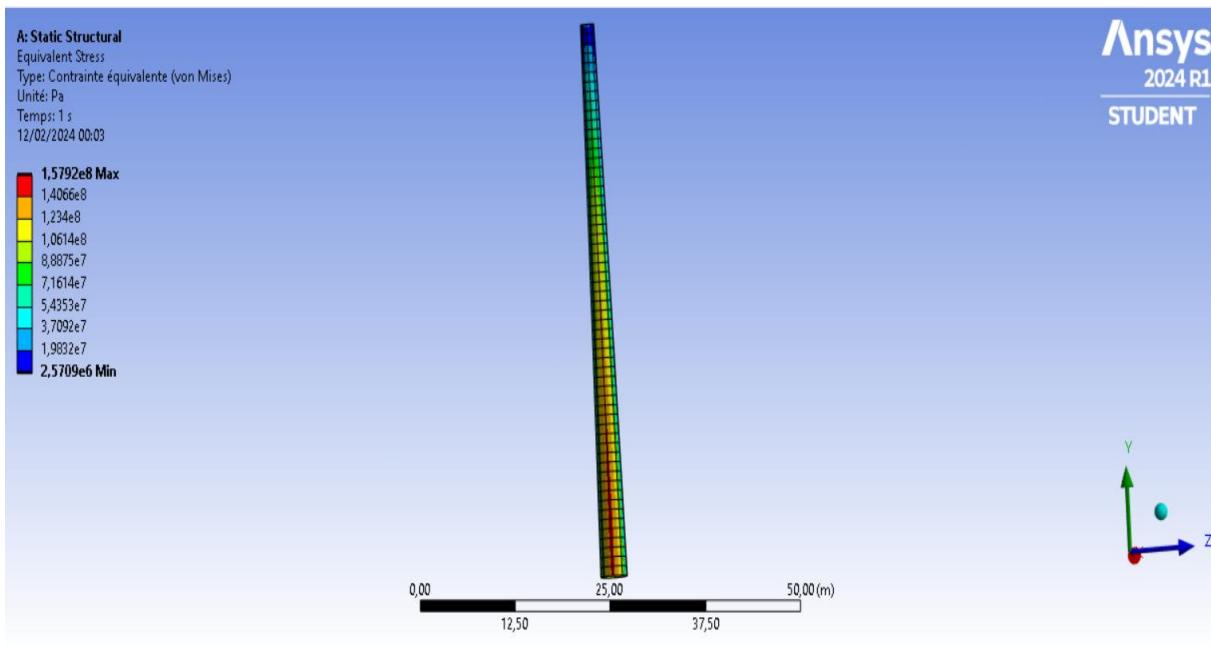


Figure 24 : Champ de contraintes appliqués sur le mât.

On remarque que la contrainte maximale appliquée sur le mât atteint **158 MPa**. Or la contrainte admissible du matériau (Structural Steel) est $\frac{Re}{s} = \frac{250}{1,5} = 167 \text{ MPa}$. Donc la condition de résistance est vérifiée pour l'épaisseur choisie **e=40mm**.

Charge critique d'Euler :

La charge critique d'Euler représente la charge maximale qu'une colonne mince, soumise à une compression axiale, peut supporter sans flétrir latéralement de manière instable. Afin de déterminer cette force, on recourt à Eigenvalue Buckling.

Dans cette étape, on supprime toutes les forces appliquées sur le mât sauf la force qui cause le flambement.

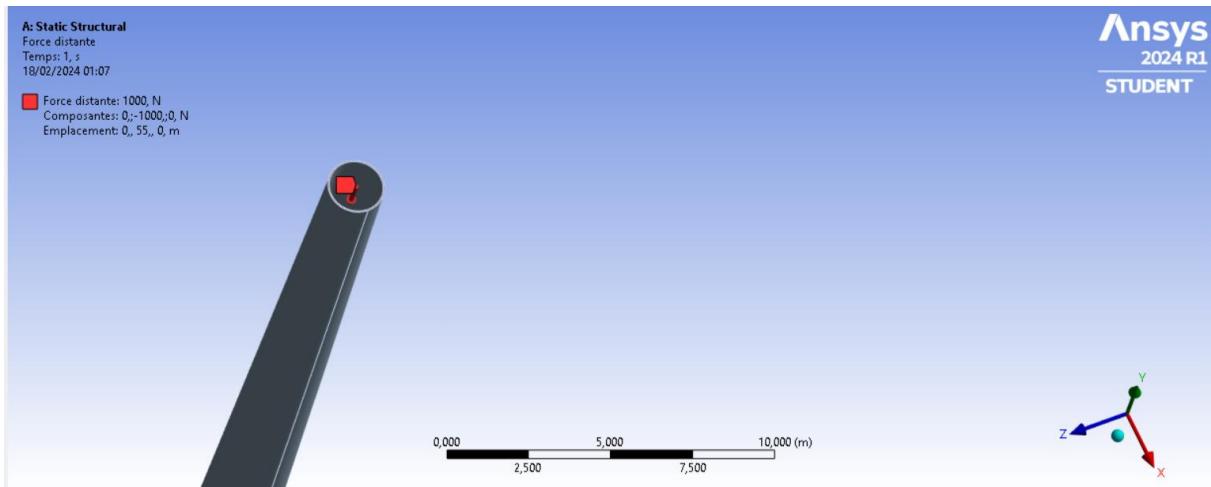


Figure 25 : Force concentrée appliquée sur le mât.

Ensuite pour déterminer la charge critique d'Euler, on multiplie la force appliquée par le coefficient multiplicateur du mode 1.

- $F = 1000 \text{ KN}$.
- Multiplicateur de charge du mode 1 = 56591.

Ainsi, on obtient

$$Fc = 56,6 \cdot 10^5 \text{ MN}.$$

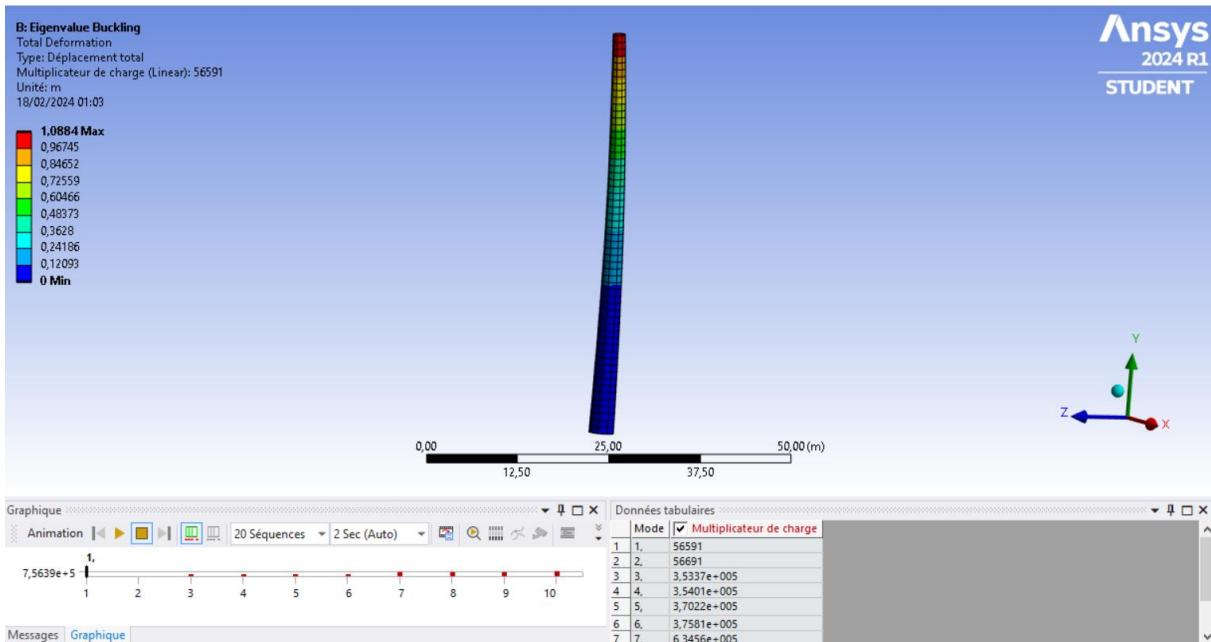


Figure 26 : Flambement du mât.

Alors, pour une épaisseur $e=40\text{mm}$, la résistance au flambement est vérifiée. ($F_{\text{critique}} > F_{\text{max}}=390 \text{ KN}$).

2. Calcul statique non linéaire

Le calcul statique non linéaire est une méthode de simulation numérique utilisée dans la conception des structures mécaniques pour analyser le comportement de ces structures sous des charges importantes ou des conditions de déformation non linéaires.

Contrairement au calcul statique linéaire, qui suppose que les matériaux se comportent de manière linéaire élastique, le calcul statique non linéaire prend en compte les comportements matériaux non linéaires tels que la plasticité, la grande déformation, le contact, etc.

L'intérêt du calcul statique non linéaire dans la simulation numérique réside dans sa capacité à modéliser de manière plus réaliste le comportement des structures soumises à des charges importantes ou à des déformations importantes, ce qui peut conduire à des conceptions plus précises et à une meilleure compréhension du comportement réel des matériaux et des structures mécaniques.

Simulation numérique :

D'une manière similaire à la première étape, on commence par définir les conditions de liaison et les charges appliquées sur le mât.

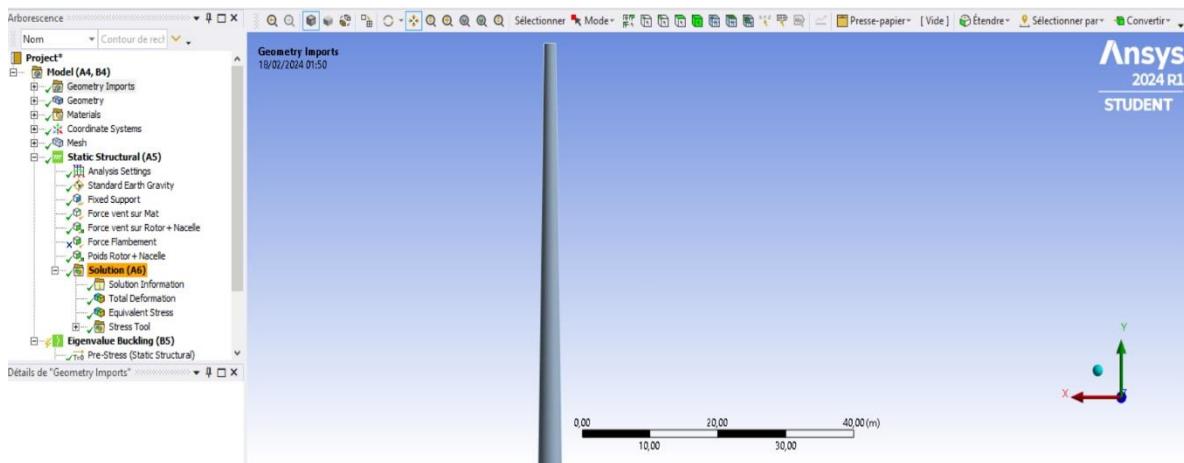


Figure 27 : Les charges et liaisons du mât.

Ensuite on implémente les contrôles d'incrément qui jouent un rôle crucial dans l'analyse. Ils permettent de définir comment la charge appliquée est progressivement augmentée ou déformée dans le cadre de l'analyse.

Détails de "Analysis Settings"

Contrôles d'incrément

Nombre d'incréments	1,
incrément courant	1,
Temps final pour cet incrément	1, s
Incrément de temps automatique	Activé
Défini par	Sous-incréments
Sous-incréments initiaux	150,
Sous-incréments minimaux	150,
Sous-incréments maximaux	1000,

Figure 28 : Les contrôles d'incréments.

Résultats :

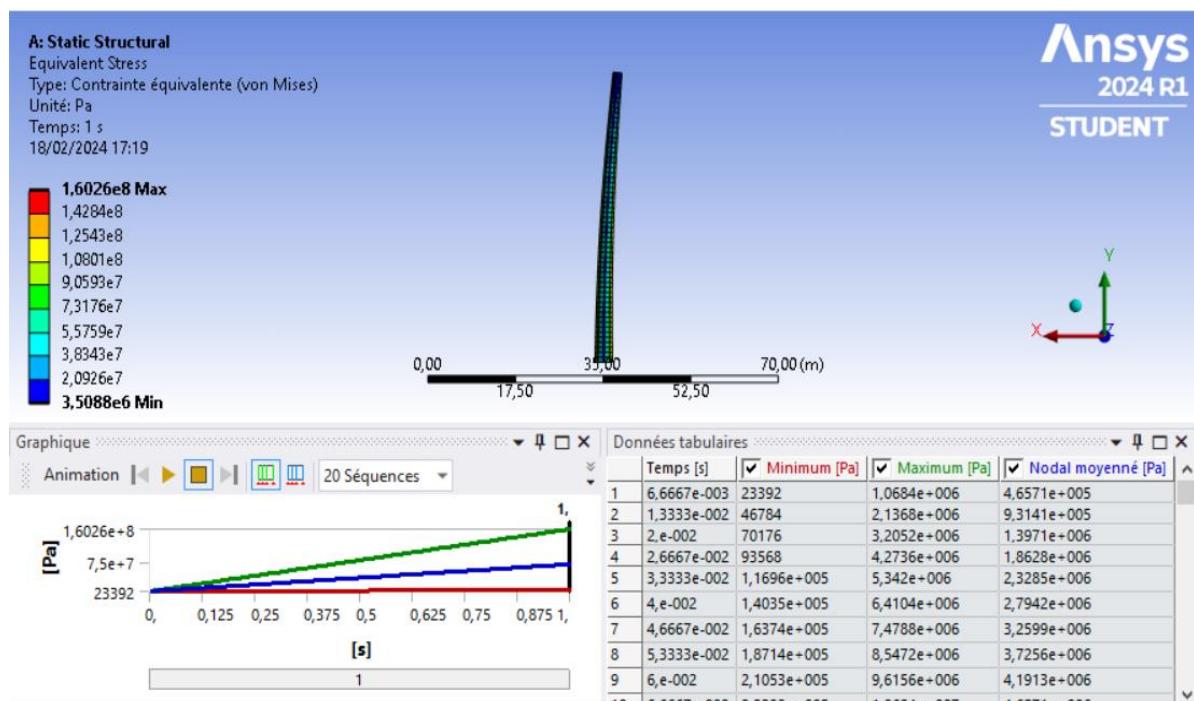


Figure 29 : Valeurs des contraintes pour les premiers incréments.

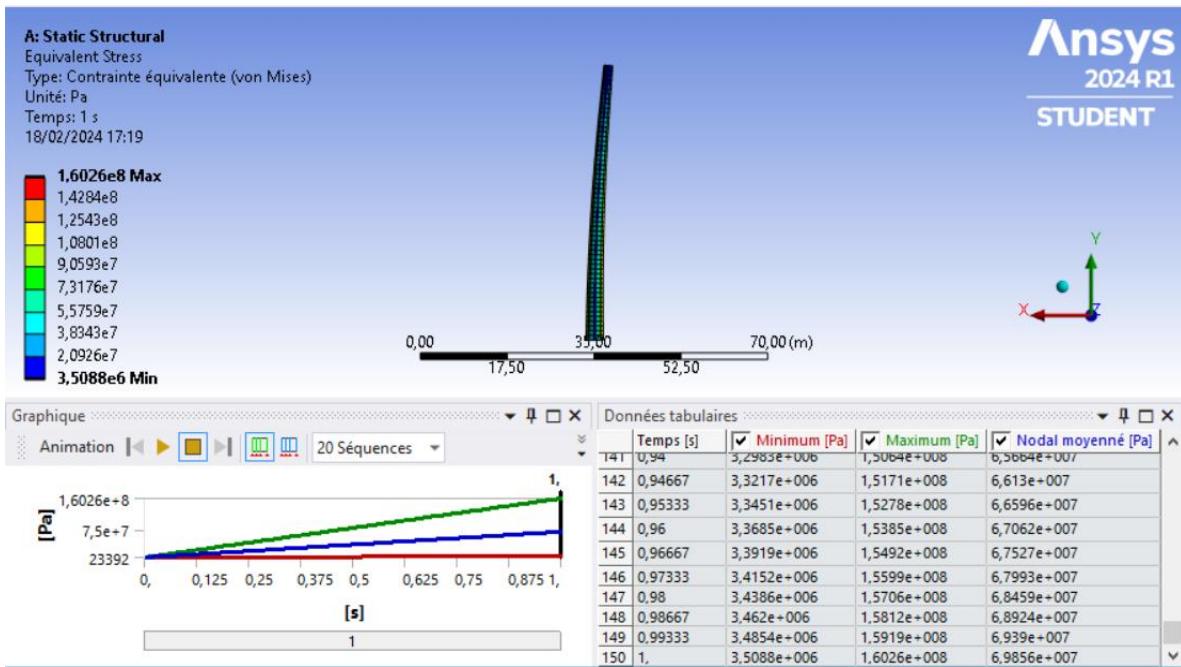


Figure 30 : Valeurs des contraintes pour les derniers incrément.

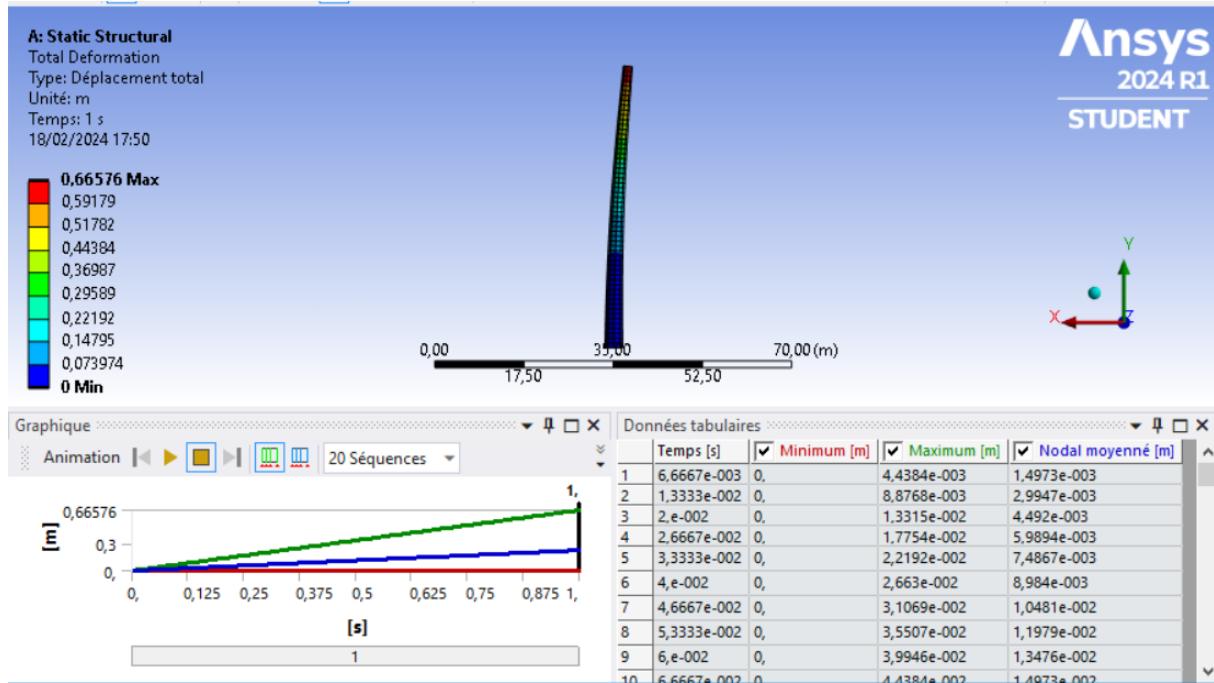


Figure 31 : Valeurs des déformations totales pour les premiers incrément.

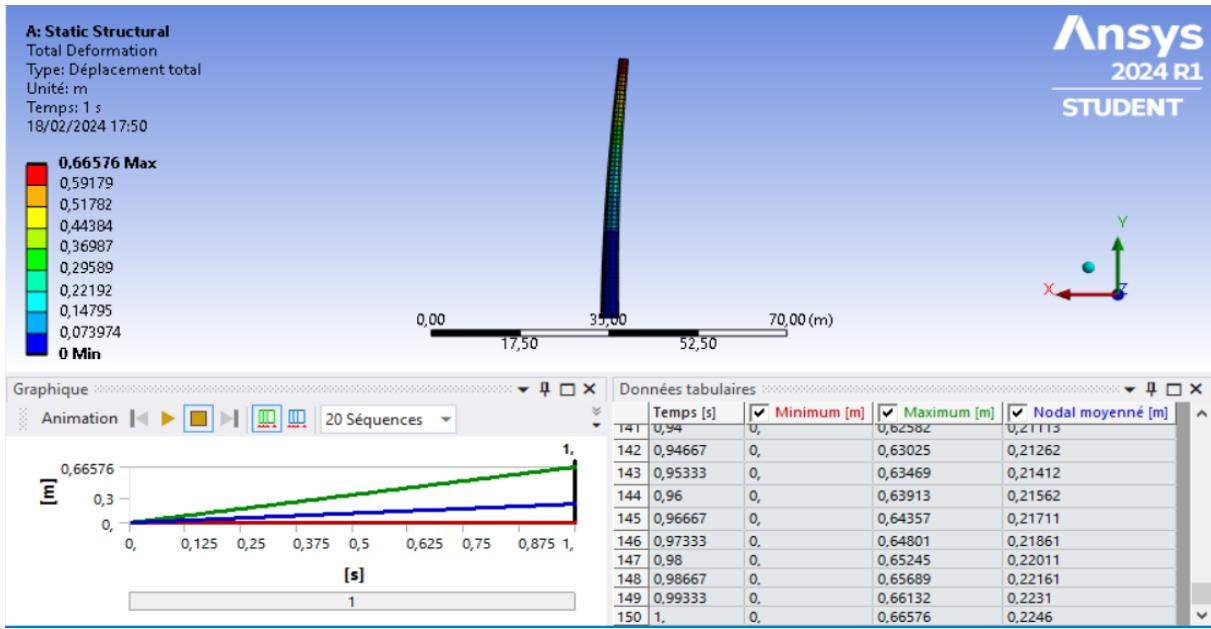


Figure 32 : Valeurs des déformations totales pour les derniers incrément.

On remarque qu'après chaque itération, la contrainte appliquée et la déformation totale du mât augmentent significativement. Ceci est dû à l'effet p-delta.

Effet P-Delta :

Sous l'effet des actions horizontales, les poteaux perdent de leur verticalité, et de ce fait l'effort normal dû à la charge gravitationnelle produit un moment par rapport à la base du poteau (effet P-delta), dont le résultat est l'amplification de l'action horizontale.

Ce phénomène peut devenir très important dans le cas de structures élancées.

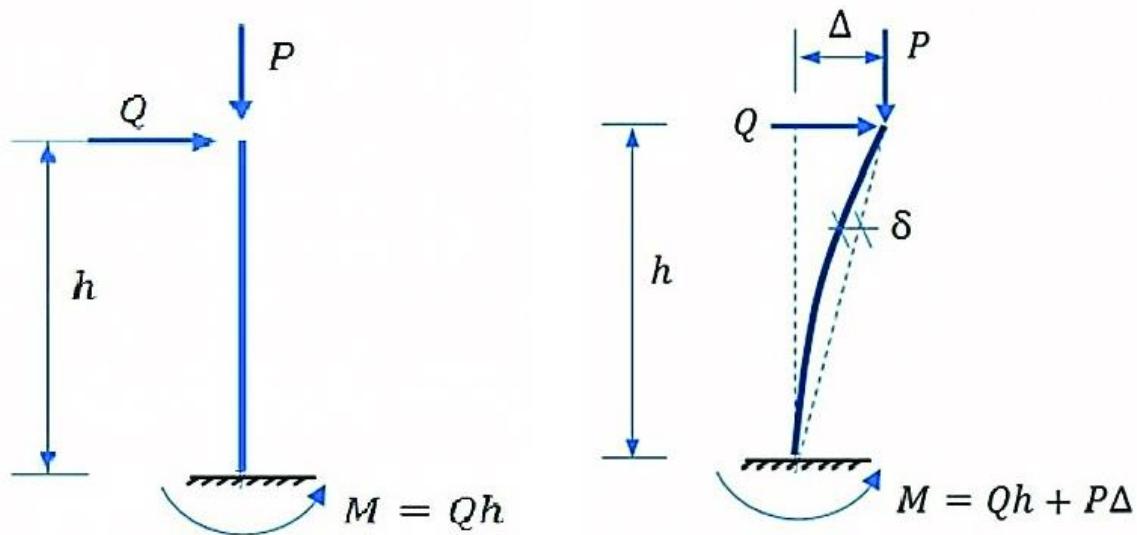


Figure 33 : Effet p-delta sur une colonne chargée en porte-à-faux.

Remarque :

Après chaque incrémentation, on applique une force sur le mat. Cette force engendre un moment qui est égale à $P.\Delta$. Ainsi, dans le mode non linéaire, la structure subit un chargement supérieur à celui du mode linéaire

