

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبو بكر بلكايد - تلمسان

Université AbouBekr Belkaïd – Tlemcen –  
Faculté de TECHNOLOGIE



## MÉMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Génie Mécanique

Spécialité : Construction Mécanique

Par: BENZENGLI Imad Eddine  
HAMZA CHERIF Mohammed Nazim

### SUJET :

**Conception et optimisation de la partie mécanique d'une éolienne à axe horizontal**

Soutenu publiquement, le 18/06/2025, devant le jury composé de :

Mr.AMIRAT Mohammed	Pr	Université de Tlemcen	Président
Mr.HADJOUI Abdelhamid	Pr	Université de Tlemcen	Examinateur
Mr.GHERNAOUT M.E.A	Pr	Université de Tlemcen	Encadreur
Mr.KARA ALI Djamal	MCA	Université de Tlemcen	Co-Encadreur

**Année universitaire : 2024 /2025**

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

---

# Remerciements

---

Louange à **Allah**, le Tout-Puissant, pour nous avoir accordé la force, la patience et la persévérance nécessaires à l'accomplissement de ce travail. Sans Sa guidance et Sa miséricorde, rien n'aurait été possible.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à **Mr. GHERNAOUT Mohammed El Amine**, notre encadrant académique, pour son accompagnement constant, ses précieux conseils, sa rigueur scientifique et sa disponibilité tout au long de ce travail. Son expertise et ses orientations ont été d'une aide précieuse pour la réussite de ce projet.

Nos sincères remerciements s'adressent également à **Mr. KARA ALI Djamal**, notre Co-encadrant, pour son suivi attentif, son écoute et ses encouragements tout au long de notre parcours.

Nous remercions également chaleureusement **Mr. AMIRAT Mohammed** d'avoir présider notre jury et **Mr. HADJOUI Abdelhamid** d'avoir accepté d'évaluer ce travail, pour leurs remarques constructives et pour le temps qu'ils nous ont accordé.

Nos pensées reconnaissantes vont aussi à **l'ensemble de nos enseignants**, qui ont su, tout au long de notre formation, nous transmettre leur savoir, leur passion et leurs valeurs. Ils ont été une source d'inspiration et de motivation tout au long de notre cursus universitaire.

Nous exprimons enfin toute notre reconnaissance à **Mr. HAMZA CHERIF Mohammed**, pour son soutien moral et matériel, sa disponibilité constante et son engagement sans faille à nos côtés. Son aide précieuse a grandement facilité l'aboutissement de ce mémoire.

À toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail, nous exprimons notre profonde reconnaissance.

---

# Dédicaces

---

À **ma mère Ilhem,**

Pour ton amour inconditionnel, ta douceur rassurante et ta foi en mes capacités. Tu as toujours été là pour me relever, me conseiller, m'encourager. Ce travail est aussi le tien, car sans toi, rien n'aurait été possible.

À **mon père Kamel,**

Pour ta force tranquille, ta patience et ton engagement discret. Tu as été un exemple de dévouement et de constance. Ce mémoire est un hommage à tes efforts silencieux et à ton soutien indéfectible.

À **mes frères Riadh et Hocine,**

Pour votre expérience, votre regard bienveillant et l'inspiration que vous m'avez toujours apportée. Vos parcours m'ont motivé à poursuivre mes efforts avec ambition et rigueur.

À **ma sœur Téma,**

Pour ta présence complice, ton soutien discret et ta confiance. Tu as toujours su trouver les mots justes pour apaiser et encourager. Ainsi qu'à son époux **Nassim**, dont la bienveillance et la discrétion ont toujours été pour moi un appui sincère et respectueux.

À **ma grand-mère Leila,**

Pour ton amour inépuisable, ton regard protecteur et ta sagesse. Tu es une source de paix et de stabilité dans ma vie.

À **ma tante Manel,**

Pour ta présence affectueuse et ta douceur si particulière, qui illumine nos vies. Ce mémoire t'est aussi dédié avec tendresse.

À **mes neveux Amira et Ziyad,**

Parce que vos sourires et votre innocence sont une source inestimable de joie. Vous me rappelez chaque jour l'importance de rêver grand.

Enfin, à **mes amis,**

Pour votre présence, vos encouragements et votre amitié précieuse. Même sans nommer chacun, vous vous reconnaissez.

---

# Dédicaces

---

**À ma chère mère, Souhila,**

Pour sa tendresse infinie, sa patience et ses prières qui m'ont soutenu tout au long de ce parcours.

**À mon père, Hamed,**

Pour sa sagesse, ses sacrifices et son soutien indéfectible, véritable pilier dans ma vie.

**À mon petit frère, Yasser, et à ma petite sœur, Lina,**

Dont la joie de vivre est une source d'inspiration et de motivation quotidienne.

**À mes amis,**

Pour leur présence, leurs encouragements sincères et les moments de complicité partagés durant ces années d'études.

À ma famille, dans son ensemble, pour son amour et son appui constant.

Cette modeste œuvre vous est dédiée, avec toute mon affection et ma reconnaissance.

---

## Résumé

---

Ce travail porte sur la conception et l'optimisation de la partie mécanique d'une éolienne domestique à axe horizontal d'une puissance nominale de 5 kW. Le projet a consisté à dimensionner mécaniquement les composants essentiels de l'éolienne tels que le rotor, les arbres de transmission, le multiplicateur de vitesse planétaire et le système de freinage, en tenant compte des efforts transmis, des contraintes mécaniques (torsion, flexion) et des coefficients de sécurité.

Une modélisation complète en 3D a été réalisée sur SolidWorks pour chaque composant, avec un choix rigoureux des matériaux basé sur leurs propriétés mécaniques. Des simulations numériques avancées ont été menées pour évaluer la résistance, la déformation et le comportement sous charge des pales, ainsi que le fonctionnement du multiplicateur de vitesse et l'écoulement du vent sur le rotor. Les résultats obtenus ont validé la cohérence des choix de conception et la fiabilité mécanique du système proposé.

### **Mots-clés :**

Éolienne, vent, conception, optimisation, mécaniques.

---

## Abstract

---

This work focuses on the design and optimization of the mechanical components of a 5 kW horizontal-axis domestic wind turbine. The project involved the mechanical sizing of key elements such as the rotor, transmission shafts, planetary gear speed increaser, and braking system, considering transmitted loads, mechanical stresses (torsion, bending), and safety factors.

A complete 3D modeling was carried out using SolidWorks for each component, with a rigorous material selection based on mechanical properties. Advanced numerical simulations were conducted to evaluate the strength, deformation, and load behavior of the blades, as well as the operation of the gear system and airflow over the rotor. The results confirmed the consistency of the design choices and the mechanical reliability of the proposed system.

### **Keywords:**

Wind turbine, wind, design, optimization, mechanical.

---

## المخلص

---

يركز هذا العمل على تصميم وتحسين المكونات الميكانيكية لتوربين رياح منزلي أفقي المحور بقدرة اسمية تبلغ 5 كيلوواط. تمثلت المهمة في حساب أبعاد العناصر الأساسية مثل الدوّار، محاور النقل، مضاعف السرعة الكوكبي، ونظام الفرملة، مع الأخذ بعين الاعتبار القوى المنقولة، والإجهادات الميكانيكية (اللي، الانحناء)، ومعاملات الأمان. تم تنفيذ نمذجة ثلاثية الأبعاد كاملة لجميع المكونات باستخدام برنامج SolidWorks، مع اختيار دقيق للمواد بناءً على خصائصها الميكانيكية. كما تم إجراء محاكاة رقمية متقدمة لتقييم المقاومة، والتشوه، وسلوك التحميل لشفرات التوربين، بالإضافة إلى تحليل أداء نظام النقل الهوائي وسير حركة الرياح على الدوّار. وقد أكدت النتائج صحة اختيارات التصميم وموثوقية الأداء الميكانيكي للنظام المقترح.

**الكلمات المفتاحية:**

توربين، رياح، تصميم، تحسين، ميكانيك.

## Table des matières

<b>Chapitre I : Présentation générale de l'énergie éolienne</b> .....	<b>1</b>
<b>1.Introduction</b> .....	<b>1</b>
<b>2.Historique</b> .....	<b>1</b>
<b>3.Description de l'énergie éolienne</b> .....	<b>3</b>
<b>4.Classification des éoliennes</b> .....	<b>4</b>
<b>4.2.Les éoliennes à axe vertical (EAV)</b> .....	<b>5</b>
<b>4.3.Les éoliennes de Darrieus</b> .....	<b>5</b>
<b>4.4.Les éoliennes de Savonius</b> .....	<b>6</b>
<b>4.5.Les éoliennes de cyclo-turbine</b> .....	<b>6</b>
<b>4.6.Classification selon l'emplacement</b> .....	<b>7</b>
<b>4.7.Classification selon la taille et l'usage</b> .....	<b>8</b>
<b>5.Application</b> .....	<b>9</b>
<b>5.1.Éoliennes Terrestres (Onshore)</b> .....	<b>9</b>
<b>5.2.Éoliennes Industrielles</b> .....	<b>9</b>
<b>5.3.Éoliennes Domestiques (Petites Éoliennes)</b> .....	<b>9</b>
<b>5.4.Éoliennes Maritimes (Offshore)</b> .....	<b>10</b>
<b>5.5.Applications Spécifiques des Éoliennes</b> .....	<b>10</b>
<b>5.6.Éoliennes Flottantes : Une Technologie Émergente</b> .....	<b>11</b>
<b>5.7.L'Énergie Éolienne dans des Contextes Isolés</b> .....	<b>11</b>
<b>6.L'énergie éolienne dans le monde :</b> .....	<b>11</b>
<b>6.1.En Algérie</b> .....	<b>12</b>
<b>6.2.Le vent :</b> .....	<b>13</b>
<b>6.3.Estimation des ressources éoliennes de l'Algérie :</b> .....	<b>13</b>
<b>7.Constitution d'une éolienne :</b> .....	<b>14</b>
<b>7.1.Pales</b> .....	<b>14</b>
<b>7.2.Rotor et Moyeu</b> .....	<b>14</b>
<b>7.3.Arbre principal (arbre lent)</b> .....	<b>15</b>
<b>7.4.Multiplicateur de vitesse</b> .....	<b>15</b>
<b>7.5.Arbre rapide</b> .....	<b>16</b>
<b>7.6.Générateur électrique</b> .....	<b>16</b>
<b>7.7.Système de freinage</b> .....	<b>16</b>
<b>7.8.Nacelle</b> .....	<b>16</b>
<b>7.9.Roulements</b> .....	<b>16</b>

## Sommaire

---

---

7.10.Mât et Fondations .....	16
8.Schéma fonctionnel de l'éolienne domestique.....	17
Chapitre II : Calculs de dimensionnement et de conception de l'éolienne .....	19
1.Justificatif technique des matériaux sélectionnés .....	20
1.1.Pales.....	20
1.2.Multiplicateur de vitesse (engrenages internes) .....	20
1.3.Arbres d'entrée et de sortie.....	21
1.4.Frein à disque mécanique.....	22
1.5.Mât.....	22
2.Dimensionnement mécanique de l'arbre d'entrée (arbre lent) .....	22
2.1.Données initiales .....	22
2.2.Calcul du couple transmis à l'arbre d'entrée (torsion pure) .....	22
2.3.Dimensionnement initial par torsion (diamètre minimum théorique).....	23
2.4.Vérification par flexion (prise en compte du poids du rotor et de l'arbre) .....	24
2.5.Vérification par contraintes combinées (flexion + torsion).....	24
2.6.Synthèse du choix du diamètre final : .....	25
3.Dimensionnement de l'arbre de sortie (arbre rapide).....	25
3.1.Hypothèses de base.....	25
3.2.Calcul du couple transmis .....	26
3.3.Dimensionnement par torsion pure.....	26
3.4.Vérification par flexion + torsion (contraintes combinées).....	26
3.5.Application numérique pour $d = 38$ mm .....	26
3.6.Choix du diamètre final.....	27
4.Dimensionnement du multiplicateur de vitesse .....	27
4.1.Choix du multiplicateur de vitesse .....	27
4.2.Présentation du système .....	28
4.3.Calcul du couple en entrée et en sortie.....	28
4.4.Répartition du couple sur les satellites.....	28
4.5.Calcul de l'effort tangentiel transmis par chaque satellite .....	28
4.6.Calcul de la force radiale sur les paliers du porte-satellite .....	29
4.7.Vérification du rapport de transmission.....	29
4.8.Détermination du module (indicatif).....	29
4.9.Conclusion.....	30
Chapitre III : Conception assistée par ordinateur de l'éolienne sur SolidWorks ...	31
1.Présentation du logiciel SolidWorks .....	32

## Sommaire

---

---

<b>2.Conception des composants principaux.....</b>	<b>32</b>
<b>2.1.Pales .....</b>	<b>32</b>
2.2.Moyeu .....	36
2.3.Arbre d'entrée .....	39
2.4.Multiplificateur de vitesse.....	41
2.5.Arbre de sortie.....	46
2.6.Frein à disque .....	47
2.7.Génératrice .....	49
2.8.Nacelle .....	50
2.9.Mât.....	54
<b>3.Assemblage final de l'éolienne .....</b>	<b>56</b>
<b>4.Mise en plan 2D des composants .....</b>	<b>57</b>
•Conclusion .....	68
<b>Chapitre IV : Étude de simulation de l'éolienne sous l'effet du vent .....</b>	<b>70</b>
<b>1.Introduction.....</b>	<b>71</b>
<b>2.Préparation du modèle .....</b>	<b>71</b>
<b>3.Mise en place de la simulation .....</b>	<b>71</b>
3.1.Étude de type statique.....	71
3.2.Maillage.....	72
3.3.Résultats de la simulation.....	72
3.4.Discussion des résultats .....	74
3.5.Conclusion.....	74
<b>4.Simulation du comportement cinématique du multiplicateur de vitesse planétaire .</b>	<b>74</b>
4.1.Introduction .....	74
4.2.Objectifs de la simulation .....	74
4.3.Préparation de l'assemblage .....	74
4.4.Analyse des résultats.....	76
4.5.Conclusion.....	76
<b>5.Analyse aérodynamique des pales par simulation d'écoulement avec SolidWorks Flow Simulation .</b>	<b>76</b>
5.1.Préparation de la simulation .....	76
5.2.Maillage.....	76
5.3.Résultats obtenus et interprétation .....	77
<b>6.Conclusion et comparaison avec les résultats théoriques : .....</b>	<b>79</b>
➤Référence .....	81
➤Référence des figures : .....	83

## Liste des figures

---

### Liste des figures

Figure I.1 Évolution des éoliennes à travers le temps (1) .....	3
Figure I.2 Schéma d'une éolienne à axe horizontal (5) .....	4
Figure I.3 Éolienne à axe horizontale (6) .....	4
Figure I.4 Schéma sur éolienne à axe verticale et horizontale (7) .....	5
Figure I.5 Éolienne verticale (8).....	5
Figure I.6 Éolienne de type Darrieus (9).....	5
Figure I.7 Éolienne de Savonius (10).....	6
Figure I.8 Éoliennes cyclo-turbine (11).....	7
Figure I.9 Éoliennes offshores (12).....	8
Figure I.10 Éolienne onshore (15).....	8
Figure I.11 Classification des éoliennes suivant la taille et ordre de grandeur associé (16) .....	8
Figure I.12 Éoliennes dans le monde (13).....	12
Figure I.13 La vitesse moyenne du vent en Algérie (14) .....	13
Figure I.14 Conception d'une pale d'éolienne (2).....	14
Figure I.15 Moyeu (3) .....	15
Figure I.16 Multiplicateur planétaire (3).....	15
Figure I.17 Caractéristique Technique d'une éolienne (4) .....	17
Figure I.18 Schéma de fonctionnement d'une éolienne domestique raccordée au réseau avec stockage (17)..	18
Figure III.1 Interface du logiciel SOLIDWORKS .....	31
Figure III.2 Importation du profil NACA 4412 sous forme de courbe .....	32
Figure III.3 Profil d'attaque de la pale (esquisse à la base) .....	32
Figure III.4 Profil intermédiaire avec ajustement de la corde et du diamètre intérieur .....	33
Figure III.5 Profil en bout de pale .....	33
Figure III.6 Détail du trou de fixation à la base de la pale .....	34
Figure III.7 Application de la flexion de la pale à l'aide de la fonction de déformation .....	34
Figure III.8 Base du moyeu créée par bossage avec révolution .....	35
Figure III.9 Extrusion .....	36
Figure III.10 Perçages de fixation des pales.....	36
Figure III.11 Répartition circulaire des supports de pale .....	37
Figure III.12 fixation de l'arbre d'entrée.....	37
Figure III.13 Taraudages .....	38
Figure III.14 Modélisation de la géométrie de base de l'arbre d'entrée .....	39
Figure III.15 Clavette sur l'arbre d'entrée.....	39
Figure III.16 Esquisse du profil axial du porte-satellites .....	40
Figure III.17 Répartition des logements des axes satellites .....	41
Figure III.18 Répétition circulaire des perçages sur la face du porte-satellites .....	41
Figure III.19 Esquisse du diamètre intérieur .....	42
Figure III.20 Début de la paroi externe de renfort .....	43
Figure III.21 Création des supports de fixation.....	43
Figure III.22 Pignon solaire.....	44
Figure III.23 Modèle 3D du pignon satellite .....	44
Figure III.24 Couronne à denture interne .....	45
Figure III.25 Vue de l'esquisse de base du disque de frein (révolution).....	46
Figure III.26 Création de la base support du disque de frein .....	47
Figure III.27 Rainure de clavette.....	47

## Liste des figures

---

Figure III.28 Perçages oblongs pour la fixation de l'ensemble.....	48
Figure III.29 Génératrice 5kW .....	48
Figure III.30 Forme générale de la nacelle.....	49
Figure III.31 Réduction de la section avant de la nacelle .....	50
Figure III.32 Volume principal obtenu par extrusion .....	50
Figure III.33 Découpe supérieure inclinée .....	51
Figure III.34 Dérive verticale à l'arrière de la nacelle .....	51
Figure III.35 Support mât.....	52
Figure III.36 Support circulaire obtenu par révolution .....	52
Figure III.37 Esquisse du profil du mât.....	53
Figure III.38 La bride inférieure.....	54
Figure III.39 La platine supérieure.....	54
Figure III.40 Assemblage de l'éolienne .....	55
Figure III.41 Zoom sur la partie mécanique de l'éolienne.....	55
Figure III.42 Mise en plan arbre d'entrée .....	57
Figure III.43 Mise en plan pignon solaire .....	58
Figure III.44 Mise en plan pignon satellite .....	59
Figure III.45 Mise en plan couronne à denture interne .....	60
Figure III.46 Mise en Plan Porte-satellites .....	61
Figure III.47 Mise en plan Moyeu.....	62
Figure III.48 Mise en plan pale .....	63
Figure III.49 Mise en plan freins.....	64
Figure III.50 Mise en plan de la nacelle .....	65
Figure III.51 Mise en plan mat .....	66
Figure IV.1 Maillage de la pale .....	70
Figure IV.2 Résultats des Contraintes de Von Mises.....	70
Figure IV.3 Résultats de déformations .....	71
Figure IV.4 Résultats de déplacements.....	71
Figure IV.5 Vitesse de l'arbre d'entrée fixé.....	73
Figure IV.6 Résultats de vitesse de l'arbre de sortie .....	73
Figure IV.7 Champ de vitesse.....	75
Figure IV.8 Distribution de la pression .....	75
Figure IV.9 Indication des pressions min/max .....	76
Figure IV.10 Lignes de courant .....	76
Figure IV.11 Forces et moments.....	77

## Liste des tableaux

TABLEAU I.1 Classification des éoliennes selon la taille et ordre de grandeur associé (16) .....	8
--	---

## **Index des symboles**

---

---

### **Index des symboles**

**C** : Couple transmis [N.m]

**P** : La puissance [Watt]

**N** : Vitesse de rotation [Tr/min]

$\sigma_e$  : Limite élastique (Re)[MPa]

**S** : Coefficient de sécurité (s)

**L** : La longueur [m]

$\tau_{adm}$  : La contrainte admissible de cisaillement [MPa]

**D** : Le diamètre[m]

**F** : Force estimée[N]

$M_f$  : Moment fléchissant [N.m]

$\sigma_{adm}$  : Contrainte admissible [MPa]

$\sigma_f$  : Contrainte de flexion [MPa]

$\tau_t$  : Contrainte de torsion [MPa]

$\sigma_{eq}$  : Contrainte équivalente de Von Mises [MPa]

**S** : Coefficient de sécurité

$F_r$  : Effort radial appliqué [N]

**I** : Rapport de transmission

$N_s$  :Vitesse de sortie (arbre rapide) [Tr/min]

$N_e$  : Vitesse d'entrée (arbre lent) [Tr/min]

$C_s$  : Couple transmis à la sortie [N.m]

$C_e$  : Couple transmis à l'entrée [N.m]

$C_{sat}$  : Couple répartie sur les satellites [N.m]

$F_t$  : L'effort tangentiel transmis [N]

$D_p$  : Diamètre primitif du pignon satellite [mm]

$F_r$  : La force radiale sur les paliers du porte-satellite [N]

$n_s$  : Nombre de satellites

$Z_c$  : Nombre de dents de la Couronne interne

$Z_s$  : Nombre de dents de Pignon central (soleil)

---

# Introduction générale

---

Face à une demande énergétique mondiale en constante augmentation et à la nécessité urgente de réduire les émissions de gaz à effet de serre, les sources d'énergie renouvelable se sont imposées comme des alternatives incontournables. Parmi elles, l'énergie éolienne occupe une place stratégique grâce à son caractère propre, inépuisable, et sa capacité à produire de l'électricité sans émissions polluantes.

L'éolienne, dispositif mécanique complexe, permet de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, et ce à travers un ensemble de composants interconnectés (pales, arbre, multiplicateur, génératrice, etc.) qui doivent être conçus avec une rigueur technique et une précision mécanique élevées. Cette transformation impose une étude approfondie des efforts mécaniques, des matériaux utilisés, ainsi que des conditions de fonctionnement, afin de garantir la performance, la durabilité et la sécurité du système.

Dans ce contexte, le présent travail porte sur la conception et l'optimisation de la partie mécanique d'une éolienne à axe horizontal d'une puissance nominale de 5 kW, destinée à un usage domestique. Il s'agit de concevoir les différents composants mécaniques de l'éolienne, tels que les pales, le rotor, les arbres, le multiplicateur de vitesse planétaire, le système de freinage, la nacelle et le mât, tout en réalisant une validation par simulation numérique à l'aide du logiciel SolidWorks.

Ce mémoire se divise en plusieurs chapitres : le premier est consacré à une présentation générale de l'énergie éolienne, de ses principes, de son évolution et de ses applications actuelles. Le second chapitre traite des calculs de dimensionnement mécanique des composants principaux. Le troisième expose la modélisation assistée par ordinateur à l'aide de SolidWorks. Enfin, un quatrième chapitre est dédié aux simulations structurelles et aérodynamiques validant la robustesse et la performance de l'éolienne conçue.

Ce projet s'inscrit dans une démarche d'ingénierie complète, mêlant théorie, modélisation et simulation, avec l'objectif de proposer une solution mécaniquement fiable et adaptée aux exigences d'une production domestique d'électricité à partir du vent.

**Chapitre I :**  
**Présentation générale**  
**de l'énergie éolienne**

## 1. Introduction :

L'énergie éolienne est une source d'énergie renouvelable propre, offrant de nombreux avantages pour l'environnement et les populations [1]. La crise pétrolière des années 1970 et le mouvement antinucléaire des années 1980 ont accru l'intérêt pour les énergies alternatives et la recherche de solutions énergétiques écologiques et économiquement viables. Les éoliennes conçues à l'époque étaient principalement destinées à la recherche et étaient extrêmement coûteuses. Avec l'aide des gouvernements finançant la recherche internationale et participant à la création d'organisations de recherche dans les années 1980, de nouvelles méthodes de production d'énergie renouvelable ont continué d'être explorées, développées et testées [2].

Le vent, source d'énergie naturelle, peut être transformé en électricité ou en force mécanique : c'est l'énergie éolienne. Le mot « éolienne » vient du grec « Éole », signifiant « rapide ». Ce terme désigne également les machines qui exploitent cette énergie [3]. L'énergie éolienne, en tant que solution propre, n'a aucun impact néfaste sur l'environnement. Ceci en fait une réelle alternative au problème de gestion des déchets nucléaires et aux émissions de gaz à effet de serre. Les éoliennes représentent aussi une chance pour plus de deux milliards de personnes isolées d'accéder enfin à l'électricité. Peu coûteuses à long terme, elles offrent une véritable opportunité d'économie face à la consommation croissante en énergie [4].

Lorsqu'un site éolien est équipé, l'objectif est de maximiser l'énergie captée en tenant compte des caractéristiques locales, comme la vitesse moyenne du vent. Malgré leur potentiel, les éoliennes ne peuvent pas être implantées partout, notamment dans les sites protégés, et elles suscitent parfois des critiques liées au bruit et à leur impact visuel. Cependant, elles restent une solution prometteuse pour répondre à la demande énergétique croissante [5].

En Afrique du Nord, notamment en Algérie, l'énergie éolienne commence à jouer un rôle crucial dans la diversification énergétique. Le pays a récemment annoncé un projet ambitieux visant à produire 1 000 mégawatts d'énergie éolienne sur dix sites prometteurs, dans le cadre du programme national des énergies renouvelables. Ce plan, qui ambitionne de générer 15 000 mégawatts d'énergie renouvelable d'ici 2035, souligne l'engagement de l'Algérie à réduire sa dépendance aux combustibles fossiles tout en contribuant à la transition énergétique globale [6].

## 2. Historique :

L'histoire des éoliennes est étroitement liée à l'évolution des civilisations et de leurs besoins énergétiques. Depuis des millénaires, l'homme a cherché à exploiter l'énergie cinétique du vent, d'abord pour des usages mécaniques simples, puis pour produire de l'électricité.

Les premières traces de l'utilisation du vent remontent à l'Antiquité. En Perse, vers 200 av. J.-C., des moulins à vent rudimentaires étaient utilisés pour moudre des grains et pomper de l'eau. Ces systèmes étaient constitués d'ailes montées sur un axe vertical et recouvertes de roseaux ou de tissus. Les civilisations du Moyen-Orient et de Chine ont également conçu des dispositifs similaires pour répondre aux besoins de l'agriculture et de l'irrigation. Ces moulins, bien qu'élémentaires, posèrent les bases de la technologie éolienne.

Au Moyen Âge, les moulins à vent furent introduits en Europe, probablement grâce aux croisades [7]. Contrairement aux moulins perses à axe vertical, les moulins européens utilisaient un axe horizontal, une innovation qui augmenta leur efficacité. Ces moulins se sont rapidement répandus dans des régions comme les Pays-Bas, l'Angleterre et la France, où ils furent employés pour moudre des céréales, scier du bois et pomper l'eau. Les ingénieurs de l'époque développèrent des mécanismes permettant aux moulins de s'orienter automatiquement face au vent, améliorant ainsi leur performance [8].

Avec la révolution industrielle au XIX<sup>e</sup> siècle, l'usage des moulins à vent déclina au profit des machines à vapeur, mais cela permit l'émergence des premières éoliennes modernes. En 1888, Charles F. Brush, un inventeur américain, construisit la première éolienne électrique à Cleveland, dans l'Ohio. Cette éolienne mesurait 17 mètres de haut, avait un rotor de 12 mètres de diamètre et produisait 12 kW d'électricité pour alimenter son domicile et son laboratoire [9]. Pendant cette période, aux États-Unis, des éoliennes à rotor métallique furent largement utilisées pour le pompage de l'eau dans les zones agricoles isolées.

Au XX<sup>e</sup> siècle, des efforts significatifs furent déployés pour perfectionner les éoliennes et les adapter à la production d'électricité. Dans les années 1920, Poul la Cour, un ingénieur danois, développa des éoliennes capables d'alimenter en électricité des communautés rurales. Dans les années 1930, l'Allemagne et l'URSS expérimentèrent des éoliennes de grande taille pour fournir de l'électricité aux régions éloignées, mais ces projets furent freinés par des limitations technologiques [10].

La crise pétrolière de 1973 marqua un tournant décisif dans l'histoire des éoliennes [2]. Face à l'augmentation des prix des combustibles fossiles, les gouvernements et les entreprises cherchèrent des alternatives énergétiques, relançant ainsi l'intérêt pour l'énergie éolienne [8]. Le Danemark joua un rôle central en investissant massivement dans la recherche et le développement de l'énergie éolienne, devenant un leader mondial dans ce domaine [11]. Les avancées technologiques permirent l'introduction de matériaux composites pour les pales, une meilleure optimisation aérodynamique et un contrôle électronique plus performant pour maximiser la production d'électricité [12].

Dans les années 2000, l'éolien offshore fit son apparition, avec les premières éoliennes maritimes installées au large des côtes danoises. Ces éoliennes offshore bénéficient de vents plus constants et plus puissants, augmentant considérablement leur rendement énergétique. Aujourd'hui, les éoliennes terrestres et offshore atteignent des capacités impressionnantes, certaines dépassant 15 MW, comme les éoliennes GE Haliade-X [13]. De plus, les systèmes modernes intègrent des capteurs et de l'intelligence artificielle pour surveiller et optimiser leur performance en temps réel.

L'avenir de l'énergie éolienne s'annonce prometteur. Avec l'objectif de neutralité carbone d'ici 2050, les installations d'éoliennes devraient continuer à croître, atteignant des capacités mondiales cumulées dépassant les 1000 GW dans les prochaines décennies. Les nouvelles technologies, comme les éoliennes flottantes pour les zones maritimes profondes et les micro-éoliennes pour les applications urbaines, ouvriront de nouvelles opportunités pour cette énergie renouvelable [14].

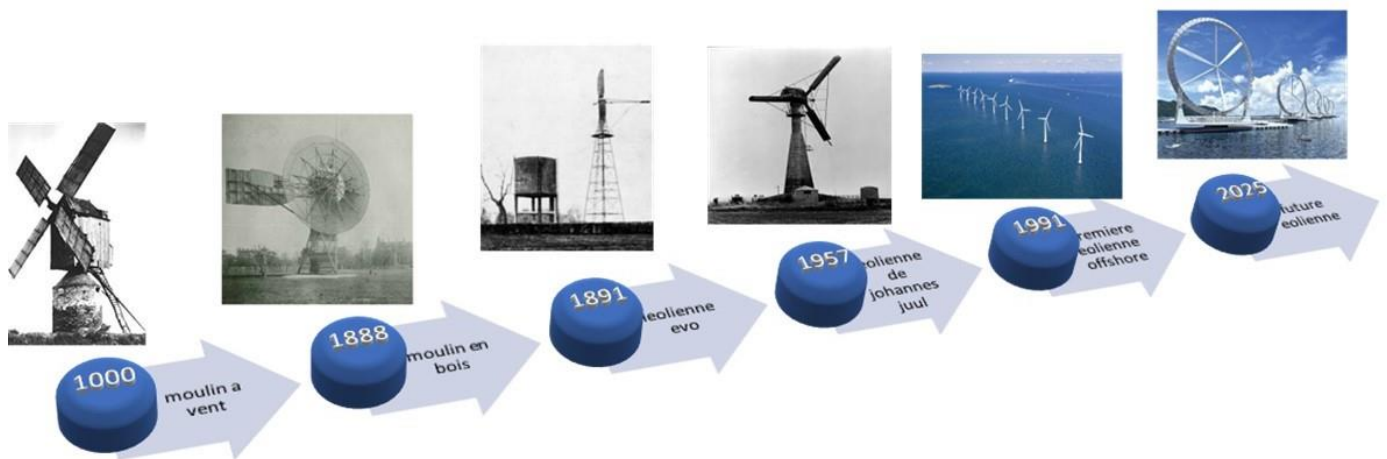


Figure I.1 Évolution des éoliennes à travers le temps (1)

### 3. Description de l'énergie éolienne :

L'énergie éolienne est une forme d'énergie renouvelable qui exploite la force du vent pour produire de l'électricité [15]. Elle repose sur un processus simple mais efficace, où l'énergie cinétique du vent est convertie en énergie mécanique, puis en énergie électrique grâce à un générateur [15]. Utilisée depuis des siècles pour moudre le grain ou pomper de l'eau, cette technologie s'impose aujourd'hui comme une des solutions majeures pour réduire les émissions de gaz à effet de serre et la dépendance aux énergies fossiles [15].

Les éoliennes, dispositifs emblématiques de cette technologie, captent l'énergie du vent à l'aide de leurs pales, qui fonctionnent selon le même principe aérodynamique que les ailes d'un avion. Lorsque le vent souffle, il fait tourner ces pales, entraînant un rotor connecté à un générateur qui transforme l'énergie mécanique en électricité. La quantité d'énergie produite dépend de plusieurs facteurs, notamment de la vitesse du vent, de la taille des éoliennes et de leur emplacement géographique. Les meilleurs sites sont souvent situés sur des collines, des plaines dégagées ou en mer, où les vents sont constants et soutenus [16].

L'énergie éolienne présente de nombreux avantages qui en font une composante clé de la transition énergétique mondiale. Elle est renouvelable et inépuisable, puisque le vent est une ressource naturelle omniprésente. De plus, sa production ne génère ni pollution atmosphérique ni émissions de gaz à effet de serre, contribuant ainsi à la lutte contre le changement climatique. Toutefois, son efficacité dépend fortement des conditions météorologiques, de la qualité des équipements et du soutien politique et économique accordé à son développement [17].

Un des aspects remarquables de l'énergie éolienne réside dans sa grande adaptabilité. Les grandes fermes éoliennes, pouvant regrouper plusieurs centaines de turbines, sont capables d'alimenter des réseaux électriques entiers. Parallèlement, les petites éoliennes domestiques permettent de produire de l'électricité pour des foyers isolés ou pour des applications spécifiques. Grâce aux avancées technologiques, les éoliennes deviennent de plus en plus performantes, abordables et accessibles, favorisant ainsi leur déploiement massif [18].

Malgré certains défis, comme l'intermittence du vent ou l'impact visuel des installations, l'énergie éolienne représente une solution crédible et durable aux enjeux énergétiques actuels.

Avec des investissements continus dans la recherche, notamment dans les éoliennes flottantes pour les zones maritimes profondes, l'énergie éolienne est appelée à jouer un rôle majeur dans la transition énergétique mondiale. Son potentiel de croissance est immense, et son développement est essentiel pour atteindre les objectifs climatiques fixés pour les décennies à venir [19].

## 4. Classification des éoliennes :

Les éoliennes peuvent être classées selon plusieurs critères, notamment l'orientation de leur axe de rotation, leur taille, leur usage spécifique ou encore leur emplacement géographique. Cependant, la classification la plus courante repose sur l'orientation de leur axe de rotation : les éoliennes à axe horizontal (EAH) et les éoliennes à axe vertical (EAV). Chacune de ces catégories présente des caractéristiques distinctes qui influencent leurs performances, leur conception et leurs applications [10].

### 4.1. Éoliennes à axe horizontal (EAH)

Les éoliennes à axe horizontal sont les plus courantes et les plus développées technologiquement. Leur rotor, composé de pales aérodynamiques, est orienté parallèlement à la direction du vent. Ces éoliennes nécessitent des systèmes d'orientation, comme des girouettes et des moteurs électriques, pour aligner le rotor face au vent. Les EAH sont principalement utilisées pour la production d'électricité à grande échelle. Leur conception optimise l'efficacité aérodynamique grâce à des pales inclinées, ce qui permet d'exploiter des vents modérés à forts. La taille des éoliennes à axe horizontal varie considérablement : les grandes éoliennes terrestres et offshore atteignent souvent des hauteurs de plus de 100 mètres, avec des diamètres de rotor dépassant parfois 150 mètres [10].



Figure I.3 Éolienne à axe horizontale (6)

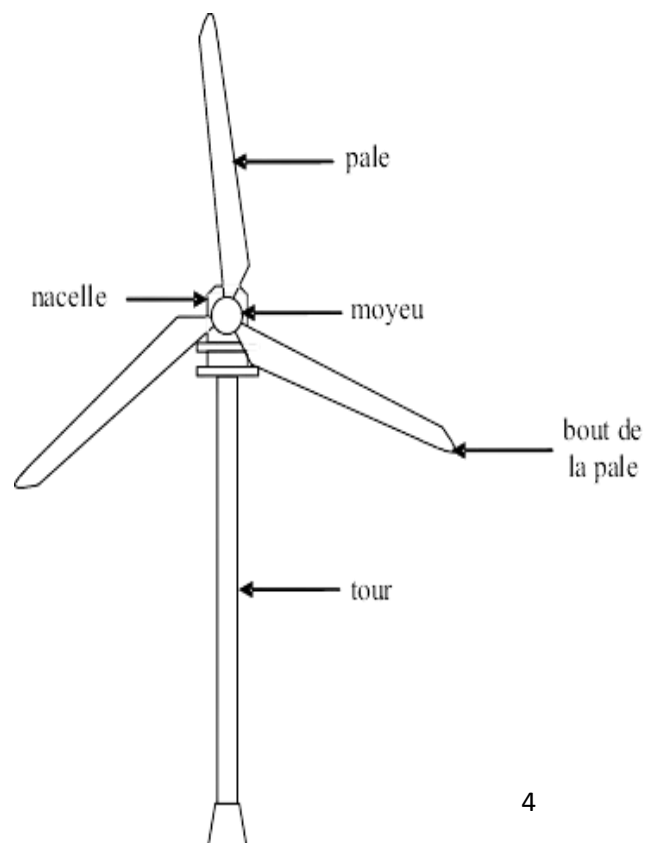


Figure I.2 Schéma d'une éolienne à axe horizontal (5)

### 4.2. Les éoliennes à axe vertical (EAV)

Les éoliennes à axe vertical possèdent un rotor perpendiculaire au sol, ce qui leur permet de fonctionner quelle que soit la direction du vent, sans nécessiter de systèmes d'orientation. Cette caractéristique leur confère une simplicité mécanique et un coût d'entretien réduit. Cependant, leur rendement énergétique est souvent inférieur à celui des éoliennes à axe horizontal en raison de pertes aérodynamiques plus importantes. Les EAV sont généralement utilisées pour des applications spécifiques, comme la production d'énergie à petite échelle dans des zones urbaines ou des environnements contraints. Elles sont également adaptées aux vents turbulents, par exemple dans des régions montagneuses ou urbaines [26].



Figure I.5 Éolienne verticale (8)

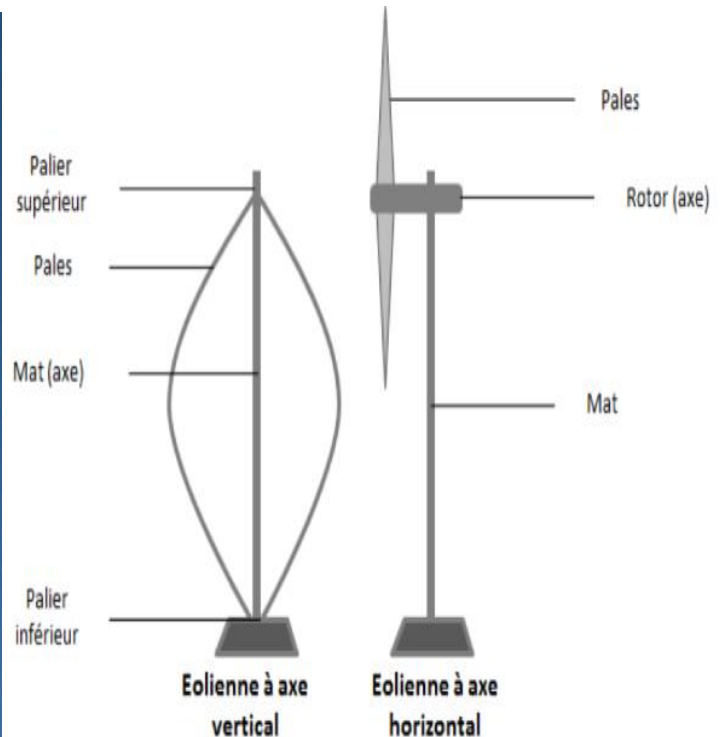


Figure I.4 Schéma sur éolienne à axe verticale et horizontale (7)

### 4.3. Les éoliennes de Darrieus

Inventées par Georges Darrieus en 1931, ces éoliennes à axe vertical possèdent des pales incurvées en forme de "V" ou de "C". Cette forme optimise leur performance aérodynamique et leur permet de produire une puissance significative, même à basse vitesse de vent. Cependant, leur démarrage nécessite souvent un moteur externe ou une petite éolienne auxiliaire [26].

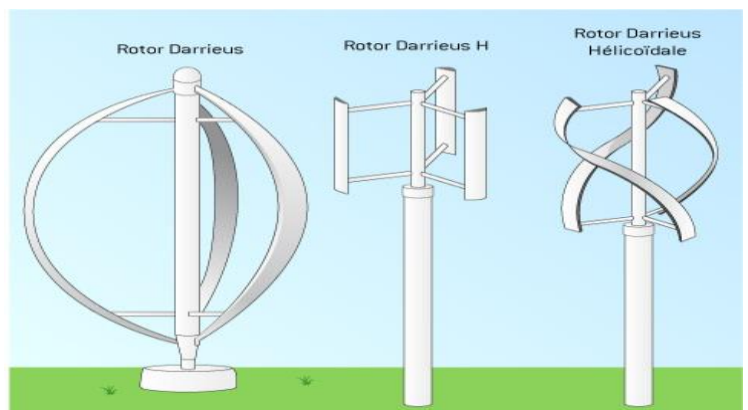


Figure I.6 Éolienne de type Darrieus (9)

#### 4.4. Les éoliennes de Savonius

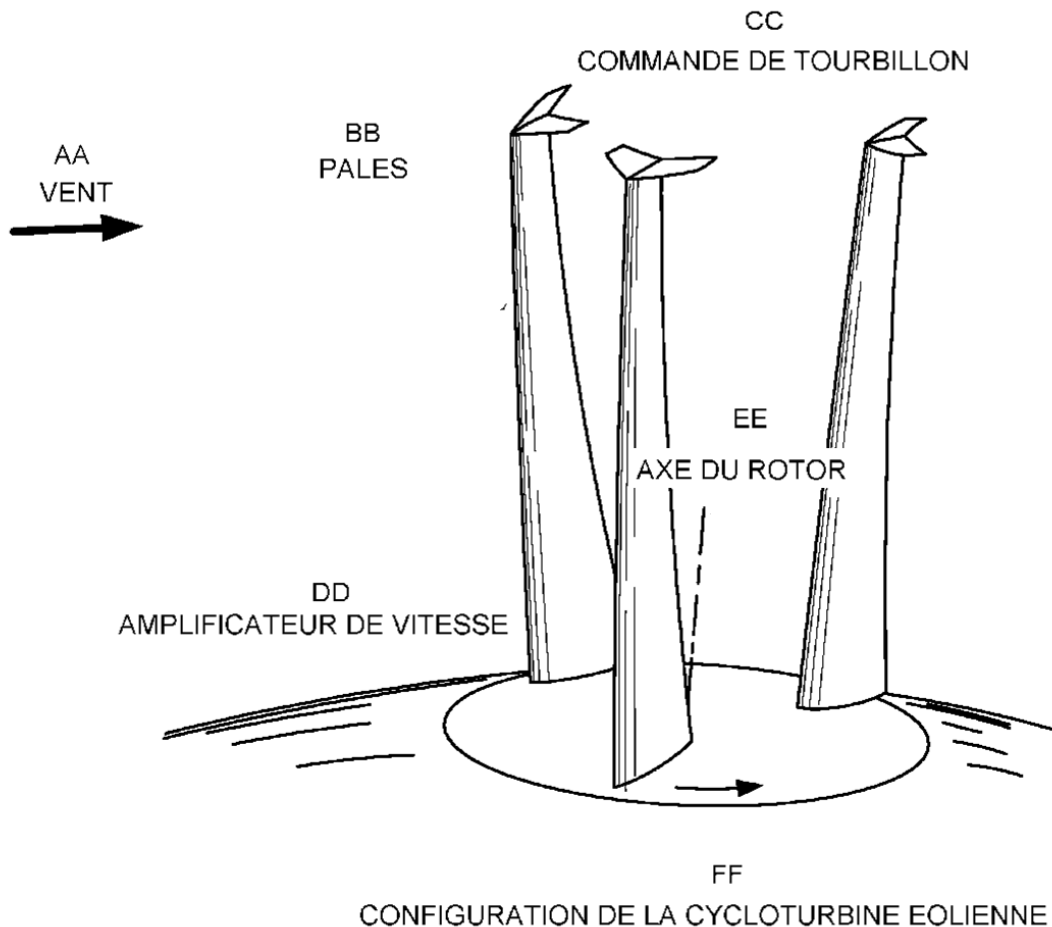
Les éoliennes de Savonius, conçues en 1924 par Sigurd Savonius, utilisent des pales semi-cylindriques pour capter le vent. Elles sont particulièrement adaptées aux vents faibles et sont souvent utilisées pour des applications de pompage d'eau ou de signalisation. Leur conception simple et robuste en fait une solution économique, mais leur rendement reste relativement faible comparé aux autres types d'éoliennes [26].



Figure 1.7 Éolienne de Savonius (10)

#### 4.5. Les éoliennes de cyclo-turbine

Les éoliennes de type cyclo-turbine disposent de pales qui s'ajustent dynamiquement en fonction de la direction du vent. Ce système améliore leur efficacité énergétique, mais complexifie leur conception et leur maintenance. Ces éoliennes sont encore en phase de recherche et de développement, avec quelques applications expérimentales [26].



- AA VENT  
 BB PALES A FORT RAPPORT D'ASPECT AVEC COMMANDE CYCLIQUE DU PAS  
 CC COMMANDE DE TOURBILLON AU NIVEAU DE LA POINTE  
 DD MONTICULE AMPLIFICATEUR DE VITESSE  
 EE AXE DU ROTOR  
 FF CONFIGURATION DE LA CYCLOTURBINE EOLIENNE

Figure 1.8 Éoliennes cyclo-turbine (11)

#### 4.6. Classification selon l'emplacement

Les éoliennes peuvent également être classées en fonction de leur emplacement :

- **Éoliennes terrestres (onshore)** : Ces éoliennes sont installées sur des terres, souvent dans des parcs éoliens situés sur des plaines ou des plateaux bénéficiant de vents constants. Les éoliennes terrestres sont plus faciles à installer et à entretenir que les éoliennes offshore [27].
- **Éoliennes maritimes (offshore)** : Installées dans les zones maritimes, souvent à plusieurs kilomètres des côtes, elles profitent de vents réguliers et puissants. Elles nécessitent des structures solides pour résister aux environnements marins, mais leur rendement est généralement supérieur [27].



Figure 1.10 Éolienne onshore (15)



Figure 1.9 Éoliennes offshore (12)

#### 4.7. Classification selon la taille et l'usage

En fonction de leur taille et de leur capacité, les éoliennes sont classées en plusieurs catégories :

- **Éoliennes industrielles** : Utilisées dans des parcs éoliens pour produire de l'électricité à grande échelle (puissance de plusieurs mégawatts) [27].
- **Petites éoliennes** : Généralement destinées à des usages domestiques ou agricoles, leur puissance varie de quelques centaines de watts à plusieurs kilowatts [27].

TABLEAU I.1 Classification des éoliennes selon la taille et ordre de grandeur associé (16)

Dénomination	Diamètre du rotor [m]	Aire balayée [m <sup>2</sup> ]	Puissance [kW]
Micro	0.5-1.25	0.2-1.2	0.1-0.4
Mini	1.25-3	1.2-7.1	0.4-2
Domestique	3-10	7-79	2-30
Petite commerciale	10-20	79-314	30-120
Moyenne commerciale	20-50	314-1963	120-750
Grande commerciale	50-100	1963-7854	750-3000
Géante commerciale	100-170	7854-22686	3000-8000

## 5. Application :

### 5.1.Éoliennes Terrestres (Onshore)

Les éoliennes terrestres, installées sur des terrains solides, représentent la majorité des infrastructures éoliennes mondiales. Elles sont généralement situées dans des zones dégagées et venteuses, telles que les plaines, les déserts et les collines [28].

### 5.2.Éoliennes Industrielles

Les éoliennes industrielles terrestres sont souvent regroupées en parcs éoliens capables de produire des centaines de mégawatts (MW), suffisants pour alimenter des milliers de foyers. Chaque turbine a une capacité typique allant de 1 MW à 8 MW. Ces parcs sont connectés aux réseaux électriques nationaux et contribuent à réduire la dépendance aux combustibles fossiles.

- **Exemples** : Le parc éolien de Gansu en Chine (capacité prévue de 20 GW) et le parc éolien Alta Wind Energy Center en Californie [28].

- **Avantages** :

- Coût d'installation relativement faible comparé aux éoliennes offshores.
- Maintenance facilitée par l'accessibilité des infrastructures.

- **Limites** :

- Nécessité de vastes espaces ouverts, pouvant entraîner des conflits d'utilisation des terres.
- Impact visuel et acoustique dans les zones habitées.

### 5.3.Éoliennes Domestiques (Petites Éoliennes)

Les petites éoliennes terrestres sont conçues pour des applications locales, telles que l'alimentation en électricité de maisons individuelles, de fermes ou de petites entreprises. Elles ont une capacité allant de quelques kilowatts (kW) à environ 100 kW.

- **Utilisations courantes** :

- Fournir de l'électricité aux zones rurales ou isolées, notamment là où les réseaux électriques sont absents.
- Pompage de l'eau pour l'irrigation ou l'approvisionnement en eau potable.
- Alimentation de systèmes de chauffage ou de refroidissement domestiques.

- **Avantages** :

- Réduction des factures énergétiques des ménages.
- Installation possible dans des zones où les grandes éoliennes sont inappropriées [28].

### 5.4.Éoliennes Maritimes (Offshore)

Les éoliennes offshore sont installées en mer, souvent à plusieurs kilomètres des côtes. Elles exploitent les vents marins, généralement plus forts et plus réguliers que les vents terrestres, ce qui leur permet de produire davantage d'électricité.

- **Caractéristiques** : Les éoliennes offshore sont plus grandes que leurs homologues terrestres, avec des pales atteignant jusqu'à 115 mètres et des hauteurs totales de plus de 260 mètres. Leur capacité peut dépasser 15 MW par turbine [28].

- **Exemples de projets offshore** :

- Parc éolien offshore Hornsea One (Royaume-Uni) : Plus de 1,2 GW de capacité.

- Parc éolien offshore Walney Extension (Royaume-Uni).

- **Avantages** :

- Réduction des conflits liés à l'utilisation des terres.

- Production d'électricité plus importante grâce à des vents marins constants.

- Moins d'impact visuel et acoustique sur les zones résidentielles.

- **Défis** :

- Coûts d'installation et d'entretien élevés, dus à la complexité des infrastructures maritimes.

- Dépendance aux technologies avancées pour résister aux conditions marines [28].

### 5.5.Applications Spécifiques des Éoliennes

Au-delà des usages énergétiques conventionnels, les éoliennes ont des applications spécifiques dans certains contextes particuliers.

#### Pompage de l'Eau

Dans les régions agricoles ou arides, des éoliennes spécifiques (souvent à axe vertical) sont utilisées pour pomper de l'eau à partir des nappes phréatiques. Cette application est particulièrement répandue dans les zones isolées où les ressources électriques sont limitées.

- **Exemple** : Les éoliennes de pompage dans les zones sahariennes ou rurales d'Afrique.

- **Avantages** :

- Peu coûteuses et adaptées aux besoins locaux.

- Simplicité d'utilisation et durabilité [28].

### 5.6.Éoliennes Flottantes : Une Technologie Émergente

Une technologie récente consiste à installer des éoliennes flottantes en mer, permettant leur déploiement dans des zones où la profondeur des fonds marins dépasse 50 mètres, là où les structures fixes ne sont pas viables.

- **Exemple** : Hywind Scotland, le premier parc éolien flottant opérationnel (30 MW).
- **Avantages** :
  - Exploitation de sites marins éloignés avec des vents plus puissants.
  - Réduction des impacts environnementaux côtiers [28].

### 5.7.L'Énergie Éolienne dans des Contextes Isolés

Dans certaines régions éloignées ou difficiles d'accès, les éoliennes représentent une solution idéale pour alimenter des stations de recherche, des bases militaires ou des villages isolés.

- **Exemple** : L'utilisation d'éoliennes en Antarctique pour alimenter des bases scientifiques comme la station Princess Elisabeth.
- **Avantages** :
  - Réduction de la dépendance aux combustibles fossiles dans des environnements extrêmes.
  - Possibilité de fonctionnement autonome avec des systèmes hybrides (associés à des panneaux solaires ou des batteries) [28].

## 6. L'énergie éolienne dans le monde :

L'énergie éolienne a connu une croissance exponentielle au cours des dernières décennies, s'établissant comme une composante essentielle du mix énergétique mondial. En 2023, la production mondiale d'électricité d'origine éolienne a atteint 2 304,44 térawattheures (TWh), représentant environ 7,8 % de la production électrique globale [34]. Cette progression est attribuable à l'augmentation des capacités installées et aux avancées technologiques améliorant l'efficacité et la fiabilité des éoliennes [34][35].

Les régions leaders en matière de production éolienne incluent l'Asie-Pacifique, l'Europe et l'Amérique du Nord. En 2023, la zone Asie-Pacifique a produit 1 045,2 TWh, soit près de 45 % de la production mondiale, suivie de l'Europe avec 614,1 TWh et de l'Amérique du Nord avec 490,1 TWh [35].

Les facteurs de charge moyens des parcs éoliens varient selon leur emplacement. Au niveau mondial, ils sont estimés à 23 % pour les installations terrestres et à 40 % pour celles implantées en mer, reflétant une meilleure performance des éoliennes offshore en raison de vents plus constants et puissants [36].



Figure 1.11 Éoliennes dans le monde (13)

## 6.1. En Algérie

L'Algérie reconnaît son potentiel significatif en matière d'énergie éolienne et s'engage activement dans le développement de cette source d'énergie renouvelable. Le ministère de l'Énergie, des Mines et des Énergies Renouvelables étudie actuellement le lancement d'un projet ambitieux visant à produire 1 000 mégawatts (MW) d'énergie éolienne, répartis sur 10 sites prometteurs à travers le pays [37][38].

Ce projet s'inscrit dans le cadre du programme national des énergies renouvelables, qui vise une capacité totale de 15 000 MW d'ici 2035. En plus de l'énergie éolienne, l'Algérie prévoit de développer 3 000 MW d'énergie solaire à travers la création de 20 nouvelles centrales, avec un taux d'intégration locale atteignant 35 % [37].

Parallèlement, l'Algérie ambitionne de devenir un leader régional et international dans la production et l'exportation d'hydrogène vert. Une stratégie nationale a été adoptée pour relever les défis liés à la production, la transformation, le stockage et le transport de cette énergie nouvelle, incluant des mégaprojets reliant l'Algérie à l'Europe [39][40].

## 6.2. Le vent :

Le vent est une manifestation naturelle résultant des différences de pression atmosphérique causées par le réchauffement inégal de la surface terrestre par le soleil. Ces mouvements d'air, influencés par la rotation de la Terre et la configuration du relief, varient en intensité et en direction selon les régions et les saisons [34]. L'énergie cinétique du vent peut être convertie en électricité grâce aux éoliennes, offrant une source d'énergie renouvelable propre et inépuisable [41].

Les caractéristiques du vent, telles que sa vitesse, sa direction et sa fréquence, sont essentielles pour déterminer le potentiel éolien d'une région. Des mesures précises et des analyses statistiques sur de longues périodes sont nécessaires pour évaluer la faisabilité de projets éoliens et optimiser le rendement des installations [41].

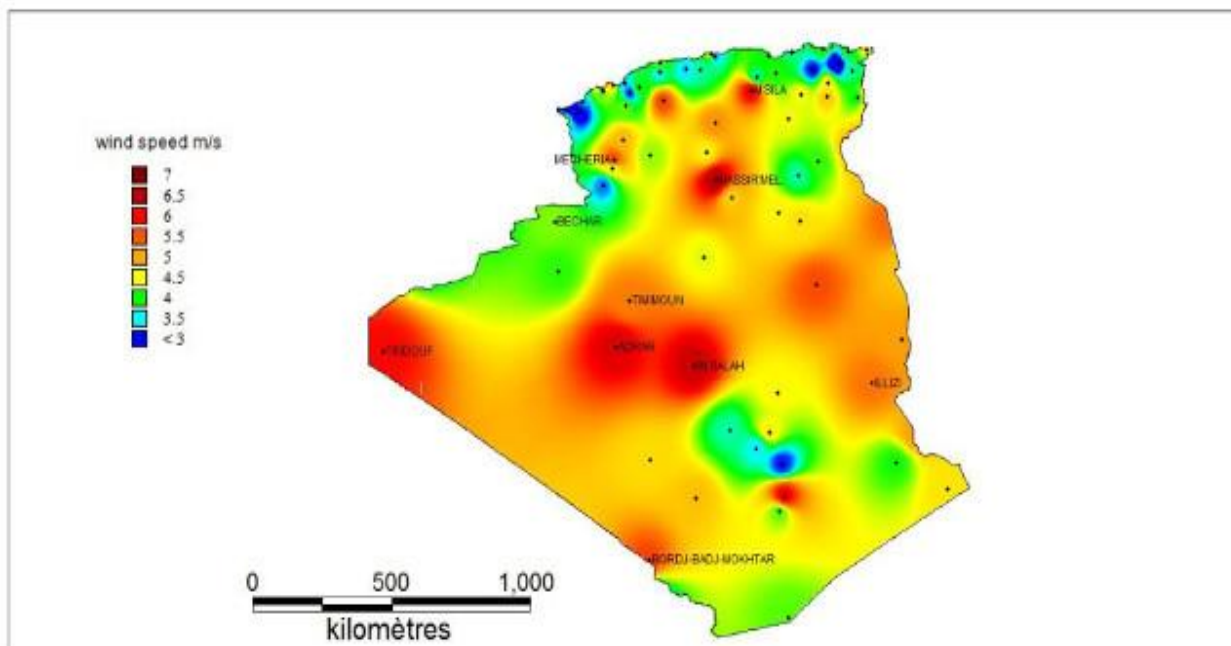


Figure 1.12 La vitesse moyenne du vent en Algérie (14)

## 6.3. Estimation des ressources éoliennes de l'Algérie :

L'Algérie dispose de potentialités considérables en matière de ressources éoliennes, notamment dans les Hauts Plateaux et les régions sahariennes, où les vitesses de vent sont élevées et constantes. Des études récentes, menées en collaboration avec la Banque mondiale, ont identifié 10 sites prometteurs pour le développement de projets éoliens, dans le cadre d'un projet visant à produire 1 000 MW d'énergie éolienne [38].

L'évaluation précise du potentiel éolien algérien nécessite des campagnes de mesure approfondies, incluant l'installation de mâts de mesure et l'utilisation de modèles numériques pour cartographier les ressources éoliennes à différentes altitudes. Ces analyses permettent d'optimiser le placement des éoliennes et de maximiser la production d'électricité [42].

Le développement de l'énergie éolienne en Algérie représente une opportunité stratégique pour diversifier le mix énergétique national, réduire la dépendance aux combustibles fossiles et contribuer aux objectifs mondiaux de réduction des émissions de gaz à effet de serre [43].

## 7. Constitution d'une éolienne :

### 7.1. Pales

Les pales sont fixées au moyeu et constituent la partie visible et mobile de l'éolienne. Leur rôle est de capter l'énergie cinétique du vent. Fabriquées en matériaux composites légers et résistants (comme la fibre de verre ou la fibre de carbone), elles sont conçues pour maximiser la portance et minimiser la traînée. En rotation, elles génèrent une énergie mécanique transmise à l'arbre principal [20].

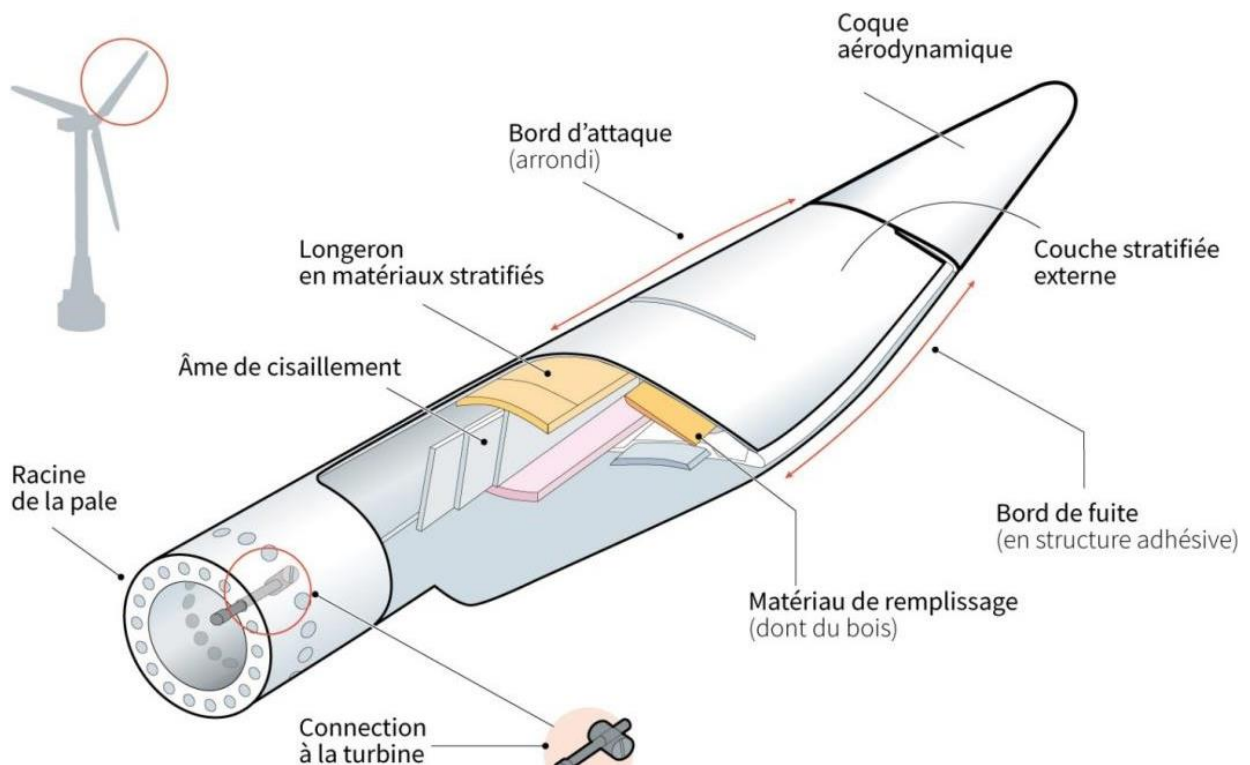


Figure I.13 Conception d'une pale d'éolienne (2)

### 7.2. Rotor et Moyeu

Le rotor est l'ensemble formé par les pales et le moyeu. Le moyeu, situé au centre du rotor, relie les pales à l'arbre principal. Il est souvent équipé d'un mécanisme de contrôle du pas (pitch control), qui ajuste l'angle d'attaque des pales pour réguler la vitesse de rotation en fonction

des conditions de vent [20]. Ce mécanisme est un élément clé du système mécanique de l'éolienne, car il protège les composants contre les surcharges lors de vents violents [20].



Figure 1.14 Moyeu (3)

### 7.3. Arbre principal (arbre lent)

L'arbre principal, ou arbre lent, est connecté au moyeu et transmet la rotation du rotor au multiplicateur de vitesse. Cet arbre est conçu pour supporter des charges importantes dues à la force du vent et au poids des pales. Il est monté sur des roulements robustes pour minimiser les pertes par frottement et garantir une rotation fluide [21].

### 7.4. Multiplicateur de vitesse

Le multiplicateur de vitesse est un composant mécanique essentiel. Il adapte la faible vitesse de rotation de l'arbre lent (10 à 20 tours par minute) à la haute vitesse requise par le générateur (1 000 à 1 500 tours par minute). Il est composé d'un système d'engrenages précis et robustes, capables de résister aux fortes contraintes mécaniques générées par le vent [20].



Figure 1.15 Multiplicateur planétaire (3)

### 7.5. Arbre rapide

L'arbre rapide est connecté à la sortie du multiplicateur de vitesse et transmet la rotation amplifiée au générateur. Contrairement à l'arbre lent, il tourne à une vitesse beaucoup plus élevée. Sa conception vise à minimiser les pertes mécaniques pour garantir un rendement optimal [21].

### 7.6. Générateur électrique

Bien que le générateur soit principalement un composant électrique, il est mécaniquement relié à l'arbre rapide. Sa fonction est de convertir l'énergie mécanique transmise par l'arbre rapide en électricité. Les générateurs utilisés dans les éoliennes sont souvent synchrones ou asynchrones [22].

### 7.7. Système de freinage

Le système de freinage garantit la sécurité et protège l'éolienne contre les dommages en cas de vents trop forts ou lors d'opérations de maintenance. Il est généralement de deux types :

- Frein mécanique ou hydraulique, monté sur l'arbre principal ou rapide.
- Frein aérodynamique, qui ajuste l'angle des pales (grâce au système de contrôle du pas) pour réduire leur vitesse [20].

### 7.8. Nacelle

La nacelle est la structure située au sommet du mât, abritant les principaux composants mécaniques (multiplicateur de vitesse, arbre principal, générateur) et électriques. Elle protège ces équipements des intempéries tout en assurant leur accessibilité pour la maintenance. La nacelle est montée sur un système d'orientation (yaw system), qui permet de faire pivoter l'ensemble pour orienter les pales face au vent [22].

### 7.9. Roulements

Les roulements sont situés à plusieurs endroits stratégiques de l'éolienne, notamment sur l'arbre principal et dans le multiplicateur de vitesse. Ils réduisent les frottements et garantissent une rotation fluide et durable des composants mécaniques. Ces roulements doivent résister à des conditions extrêmes, comme les vibrations, les variations de charge, et les températures changeantes [23].

### 7.10. Mât et Fondations

- Le mât supporte l'ensemble de l'éolienne et permet de positionner les pales à une hauteur optimale pour capter des vents constants et puissants. Fabriqué en acier ou en béton, il intègre souvent des dispositifs d'accès pour la maintenance [20].
- Les fondations assurent la stabilité de l'éolienne en résistant aux charges dynamiques et aux forces du vent. En milieu offshore, des systèmes spécifiques comme les monopieux ou les fondations flottantes sont utilisés [20].

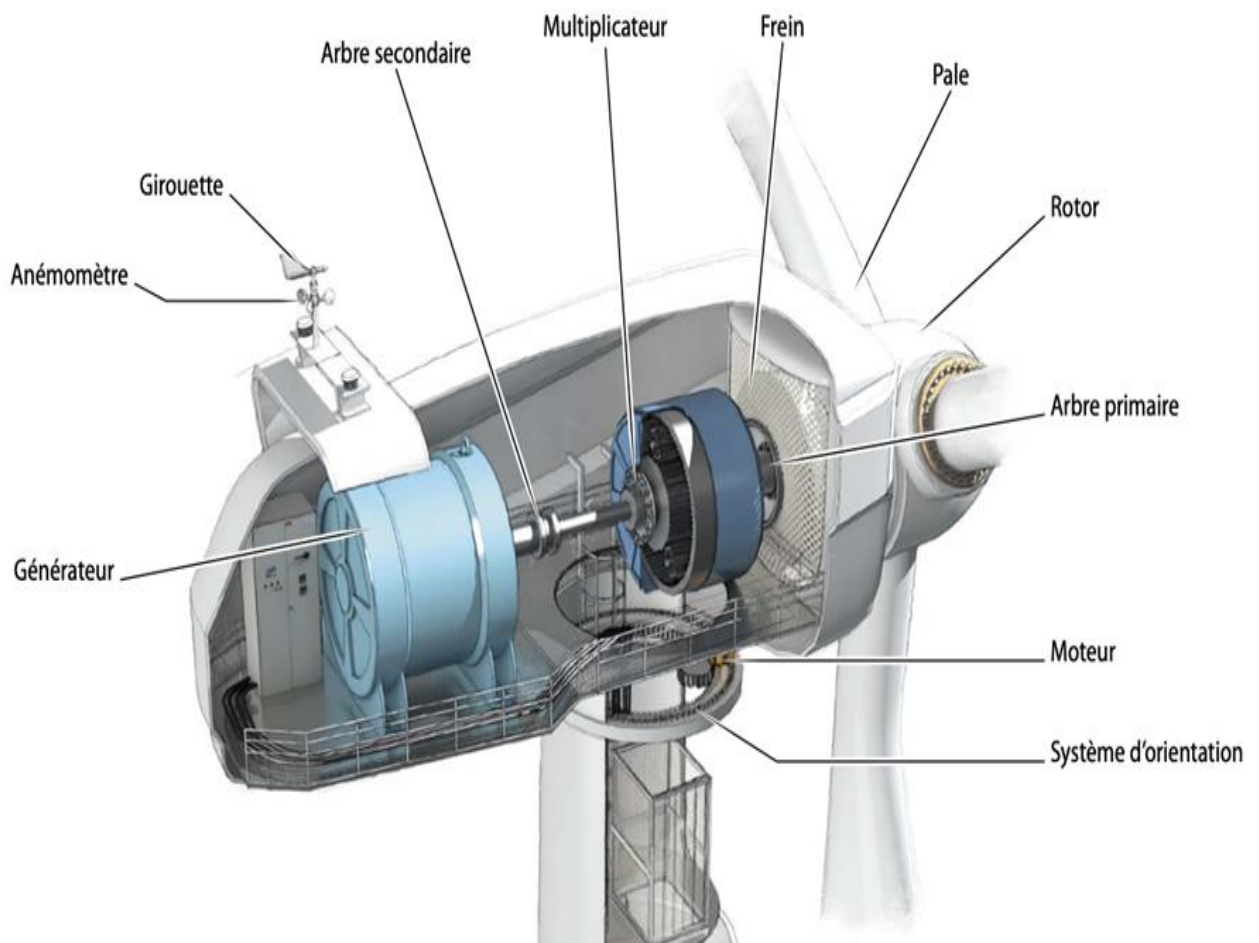


Figure I.16 Caractéristique Technique d'une éolienne (4)

## 8. Schéma fonctionnel de l'éolienne domestique

Le schéma présenté ci-dessous illustre le fonctionnement général d'une éolienne domestique à axe horizontal intégrée à un système de gestion et de distribution de l'énergie électrique.

Le vent met en rotation les pales, ce mouvement est transmis au moyeu puis à l'arbre principal. Le multiplicateur de vitesse augmente la fréquence de rotation afin de répondre aux exigences de fonctionnement de la génératrice. Celle-ci convertit l'énergie mécanique en électricité, généralement sous forme de courant continu.

Deux circuits sont alors envisageables à partir de cette production :

- **Le circuit de consommation directe**, où l'électricité produite est d'abord stockée dans un accumulateur (batterie), puis convertie en courant alternatif via un onduleur, afin d'alimenter les appareils électriques du logement.

- **Le circuit de réinjection dans le réseau**, dans lequel l'énergie convertie est directement injectée dans le réseau public après passage par un onduleur adapté. Ce circuit est équipé d'un compteur de production pour quantifier l'énergie revendue.

L'ensemble du système est supervisé par un **système de régulation électrique**, garantissant une gestion optimale de la production et de la consommation. Un **système de freinage mécanique** est également intégré pour assurer la sécurité de l'installation en cas de vents excessifs. Enfin, la **nacelle**, montée sur un mât, est orientée automatiquement face au vent grâce à un système d'orientation, assurant ainsi un rendement énergétique optimal.

Ce schéma constitue une base essentielle pour comprendre les différentes étapes de conversion et de gestion de l'énergie dans le cadre d'une installation éolienne domestique. Il précède les calculs détaillés de dimensionnement abordés dans les sections suivantes.

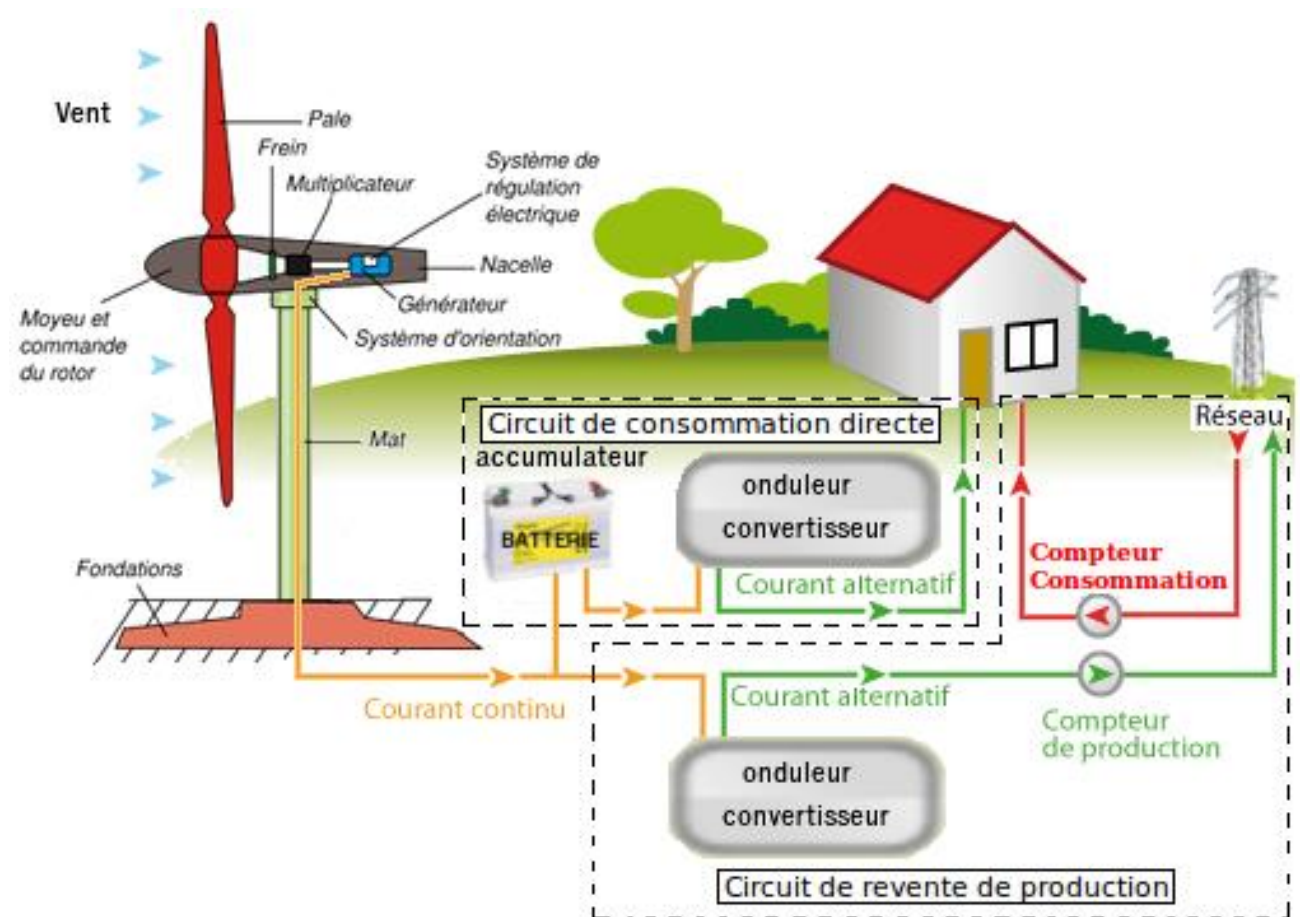


Figure I.17 schéma de fonctionnement d'une éolienne domestique raccordée au réseau avec stockage (17)

**Chapitre II :**  
**Calculs de dimensionnement et**  
**de conception de l'éolienne**

## 1. Justification technique des matériaux sélectionnés

Le choix approprié des matériaux pour chaque composant de l'éolienne repose sur l'analyse approfondie des contraintes mécaniques spécifiques (fatigue, usure, flexion, torsion), conditions environnementales (corrosion, humidité, exposition aux intempéries) ainsi que sur les propriétés mécaniques intrinsèques des matériaux disponibles.

### 1.1. Pales

Matériau : **Fibre de carbone (Thornel Mat VMA)**

- **Masse volumique** :  $\approx 2,00 \text{ g/cm}^3$
- **Résistance à la traction** :  $\approx 1400 \text{ MPa}$
- **Module de Young** :  $\approx 170 \text{ GPa}$  [44]

**Justification technique** : La fibre de carbone Thornel Mat VMA est sélectionnée pour ses propriétés mécaniques élevées (rapport rigidité/masse exceptionnel). La faible masse volumique diminue le poids des pales, réduisant les forces centrifuges et les contraintes induites sur les composants rotatifs (arbre principal, moyeu). Sa rigidité élevée permet de limiter la déformation sous l'effet des efforts aérodynamiques, optimisant ainsi le rendement aérodynamique du profil NACA 4412 choisi. La grande résistance à la fatigue garantit une excellente durée de vie en milieu fortement sollicité par les variations cycliques de charge dues au vent.

**Comparatif** : Fibre de verre (E-glass), bien que couramment utilisée pour les pales d'éoliennes en raison de son faible coût, présente une rigidité et une résistance mécanique inférieures. Son module de Young ( $\sim 70 \text{ GPa}$ ) est significativement plus bas, ce qui entraîne des déformations plus importantes sous charge et une efficacité aérodynamique réduite.

### 1.2. Multiplicateur de vitesse (engrenages internes)

**Pignons satellites, pignon central (soleil), et couronne interne**

Matériau : **Acier cémenté 16MnCr5**

- **Limite d'élasticité (cœur)** :  $\approx 780 \text{ MPa}$
- **Résistance à la traction (cœur)** :  $\approx 1100 \text{ MPa}$
- **Dureté superficielle (cémentation)** : 58 à 62 HRC [45]

**Justification technique** : L'acier cémenté 16MnCr5 est choisi en raison de ses caractéristiques optimisées pour les dentures engrenantes. La cémentation apporte une haute dureté superficielle, essentielle pour assurer une résistance à l'usure et à la fatigue de contact, particulièrement dans des conditions de vitesse élevée et efforts radiaux importants. Le cœur reste ductile pour absorber les chocs et vibrations inhérentes aux transmissions planétaires, garantissant ainsi une bonne résistance aux contraintes de flexion et de torsion répétées sur la durée.

**Comparatif** : Acier trempé AISI 1045 peut être envisagé, mais il ne présente pas une dureté superficielle aussi élevée après traitement thermique. De plus, l'absence de gradient de dureté entre surface dure et cœur ductile compromet la résistance à la fatigue de contact.

## Porte-satellite

Matériau : **Acier allié AISI 4340 (traité thermiquement, recuit)**

- **Limite élastique** : 740 MPa
- **Résistance à la traction** :  $\approx 1100$  MPa
- **Dureté (recuit)** :  $\approx 30-40$  HRC [46]

**Justification technique** : Le porte-satellite subit des sollicitations combinées : radiales (pression des engrenages) et tangentielles (transmission du couple). L'acier AISI 4340, grâce à sa haute résistance à la traction, à la fatigue et son excellente ténacité, est parfaitement adapté à ces contraintes combinées complexes. La résilience élevée garantit que les pics de charges dynamiques n'engendrent pas de déformation permanente ou de rupture fragile.

**Comparatif** : Acier S355 aurait pu être utilisé pour des charges statiques, mais sa résistance mécanique ( $\sim 470-630$  MPa) est insuffisante pour les contraintes dynamiques intenses d'un porte-satellite, en particulier en transmission planétaire.

## Coque du multiplicateur

Matériau : **Acier au carbone doux AISI 1020**

- **Limite élastique** :  $\approx 350$  MPa
- **Résistance à la traction** :  $\approx 420-500$  MPa [47]

**Justification technique** : La coque ne subit que des charges statiques modérées, destinées principalement à supporter le poids et à maintenir l'alignement interne des composants. L'acier AISI 1020 offre une bonne stabilité dimensionnelle, une excellente soudabilité et usinabilité facilitant le processus de fabrication et d'assemblage, tout en maintenant les coûts de fabrication bas.

**Comparatif** : Fonte grise (GG25) présente une bonne rigidité et usinabilité mais souffre d'une faible résistance aux chocs. Son comportement fragile est inadapté aux contraintes dynamiques résiduelles transmises par les engrenages.

### 1.3. Arbres d'entrée et de sortie

Matériau : **Acier inoxydable AISI 316 (recuit)**

- **Limite élastique**: 290 MPa
- **Résistance à la traction**: 580 MPa
- **Masse volumique**:  $8 \text{ g/cm}^3$  [48]

**Justification technique** : Les arbres d'entrée et de sortie transmettent des efforts combinés élevés (couple, flexion et vibrations cycliques). L'acier inoxydable AISI 316 offre une résistance suffisante contre les contraintes mécaniques (torsion/flexion combinées), tout en garantissant une résistance exceptionnelle à la corrosion, essentielle en environnement extérieur soumis aux intempéries. Sa ductilité permet d'absorber les pics de contraintes sans fracture, et sa bonne résistance à la fatigue augmente la fiabilité à long terme des arbres.

**Comparatif** : Acier allié 42CrMo4 présente de meilleures caractéristiques mécaniques (limite élastique  $>900$  MPa) mais une faible résistance à la corrosion. Il nécessite un traitement de surface ou un environnement protégé, ce qui n'est pas optimal pour des arbres exposés.

### 1.4. Frein à disque mécanique

Matériau : Acier allié

**Justification technique :** Le frein à disque doit supporter des températures élevées dues aux frottements lors du freinage d'urgence. L'acier allié choisi présente une bonne conductivité thermique, permettant une dissipation efficace de la chaleur, ainsi qu'une résistance mécanique élevée assurant une fiabilité lors des freinages brusques. Sa résistance à l'usure garantit une longue durée de vie même avec une utilisation fréquente.

**Comparatif :** Fonte au graphite lamellaire (type GG25) est parfois utilisée pour les disques de frein grâce à son bon comportement thermique, mais elle présente une faible résistance aux chocs mécaniques, ce qui peut poser problème en cas de freinage brutal ou asymétrique.

### 1.5. Mât

Matériau : Acier de construction S355N (1.0545)

- **Limite élastique :**  $\geq 355$  MPa
- **Résistance à la traction :**  $\approx 470-630$  MPa [49]

**Justification technique :** Le mât doit supporter l'ensemble des charges dynamiques induites par le poids de la nacelle, les forces aérodynamiques, ainsi que les vibrations induites par la rotation des pales. Le choix du S355N est justifié par sa limite élastique élevée garantissant une stabilité structurelle sous fortes sollicitations mécaniques et dynamiques, ainsi qu'une bonne résilience permettant d'absorber les vibrations et les éventuels chocs dus au vent fort.

**Comparatif :** Acier S235 aurait pu être envisagé pour des structures moins sollicitées, mais sa limite élastique ( $\sim 235$  MPa) est insuffisante pour assurer la tenue du mât sur la durée, surtout en cas de vent violent ou de vibrations prolongées.

## 2. Dimensionnement mécanique de l'arbre d'entrée (arbre lent)

Pour ce chapitre on fixe la vitesse du vent à **20m/s**

### 2.1. Données initiales

- **Puissance nominale de l'éolienne :**  $P = 5000$  W = 5 kW
- **Vitesse de rotation de l'arbre d'entrée :**  $N = 668$  tr/min
- **Matériau choisi :** Acier inoxydable (AISI 316)
- **Limite élastique (Re) :**  $\sigma_e = 290$  MPa
- **Coefficient de sécurité (s) :**  $s = 2$
- **Longueur de l'arbre d'entrée :**  $L = 500$  mm = 0,5 m

### 2.2. Calcul du couple transmis à l'arbre d'entrée (torsion pure)

Le couple transmis à l'arbre est calculé par la formule :

$$C = \frac{P \times 30}{\pi \times N} \dots (1)$$

*Application numérique :*

$$C = \frac{5000 \times 30}{\pi \times 668}$$

$$C = \frac{150000}{2098,58}$$

$$C \approx 71,5 \text{ N.m}$$

Le couple sur l'arbre d'entrée est donc :

$$\boxed{C = 71,5 \text{ N.m}}$$

### 2.3. Dimensionnement initial par torsion (diamètre minimum théorique)

En torsion, la contrainte admissible de cisaillement ( $\tau_{adm}$ ) est déterminée à partir de la limite élastique divisée par un coefficient de sécurité et un facteur de Von Mises :

$$\tau_{adm} = \frac{\sigma_e}{s \times \sqrt{3}} \dots (2)$$

*Application numérique :*

$$\tau_{adm} = \frac{290}{2 \times \sqrt{3}}$$

$$\tau_{adm} \approx 83,72 \text{ MPa}$$

Le diamètre minimum de l'arbre d'entrée en torsion se détermine avec :

$$d = \sqrt[3]{\frac{16 \times C}{\pi \times \tau_{adm}}} \dots (3)$$

*Application numérique :*

$$d = \sqrt[3]{\frac{16 \times 71,5}{\pi \times 83,72 \times 10^6}}$$

$$d = \sqrt[3]{4,35 \times 10^{-6}}$$

$$d \approx 0,0164 \text{ m} = 16,4 \text{ mm}$$

Diamètre théorique en torsion:

$$\boxed{d \approx 16,4 \text{ mm}}$$

### 2.4. Vérification par flexion (prise en compte du poids du rotor et de l'arbre)

On considère que l'arbre supporte une force issue du poids de l'ensemble rotor + moyeu. Prenons un poids estimatif (rotor + moyeu) de **300 N** (environ 30 kg) placé à l'extrémité de l'arbre :

- **Force estimée:**  $F = 300 \text{ N}$
- **Bras de levier :** longueur de l'arbre  $L = 0,5 \text{ m}$

Moment fléchissant maximal à la base de l'arbre :

$$M_f = F \times L \dots (4)$$

*Application numérique :*

$$M_f = 300 \times 0,5 = 150 \text{ N.m}$$

Moment fléchissant:

$$\boxed{M_f = 150 \text{ N.m}}$$

Le diamètre nécessaire en flexion pure est donné par :

$$d = \sqrt[3]{\frac{32 \times M_f}{\pi \times \sigma_{adm}}} \dots (5)$$

Avec

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_e}{s} = \frac{290}{2} = 145 \text{ MPa} \dots (6)$$

*Application numérique :*

$$d = \sqrt[3]{\frac{32 \times 150}{\pi \times 145 \times 10^6}}$$

$$d = \sqrt[3]{1,053 \times 10^{-5}}$$

$$d \approx 0,0219 \text{ m} = 21,9 \text{ mm}$$

Diamètre théorique en flexion:

$$\boxed{d \approx 21,9 \text{ mm}}$$

### 2.5. Vérification par contraintes combinées (flexion + torsion)

Calcul des contraintes :

#### 1. Contrainte de flexion ( $\sigma_f$ ) :

$$\sigma_f = \frac{32 \times M_f}{\pi \times d^3} \dots (7)$$

Application numérique :

$$\sigma_f = \frac{32 \times 150}{\pi \times (0.048)^3} = 13\,815\,533.25 \text{ Pa} \approx 13.82 \text{ MPa}$$

## 2. Contrainte de torsion ( $\tau_t$ ) :

$$\tau_t = \frac{16 \times C}{\pi \times d^3} \dots (8)$$

Application numérique :

$$\tau_t = \frac{16 \times 71.5}{\pi \times (0.048)^3} = 3\,292\,702.09 \text{ Pa} \approx 3.29 \text{ MPa}$$

## 3. Contrainte équivalente de Von Mises ( $\sigma_{eq}$ ) :

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_f^2 + 3 \times \tau_t^2} \dots (10)$$

Application numérique :

$$\sigma_{eq} = \sqrt{(13\,815\,533.25)^2 + 3 \times (3\,292\,702.09)^2} = 14\,946\,391.55 \text{ Pa} \approx 14.95 \text{ MPa}$$

Ces valeurs doivent être comparées à la limite élastique du matériau choisi (AISI 316 avec  $\sigma_e = 290 \text{ MPa}$ ). Avec un coefficient de sécurité pris généralement à 2 :

- Limite admissible =  $\frac{290}{2 \times \sqrt{3}} = 83,72 \text{ MPa} \dots (11)$

Ainsi, la contrainte équivalente obtenue (14.95 MPa) est largement inférieure à la limite admissible (83,72 MPa), validant largement la dimension choisie (48 mm).

## 2.6.Synthèse du choix du diamètre final :

Le diamètre théorique obtenu par torsion est faible (16,4 mm), par flexion il est plus élevé (21,9 mm). Toutefois, afin de garantir la fiabilité, la durabilité à long terme, et en tenant compte d'éventuelles contraintes supplémentaires (vibrations, défauts d'alignement, effets dynamiques non pris explicitement en compte), un diamètre largement supérieur est recommandé.

Ainsi, après analyse détaillée et application de la contrainte équivalente de Von Mises, un diamètre de 48 mm pour l'arbre d'entrée est retenu pour assurer une robustesse et sécurité optimales.

## 3. Dimensionnement de l'arbre de sortie (arbre rapide)

### 3.1.Hypothèses de base

- **Puissance transmise:**  $P = 5000 \text{ W}$
- **Vitesse de rotation :**  $N = 1500 \text{ tr/min}$
- **Matériau :** Acier inoxydable AISI 316  $\rightarrow \tau_{adm} = \frac{R_e}{S} = \frac{290}{2} = 145 \text{ MPa} \dots (12)$
- **Coefficient de sécurité:**  $S = 2$
- **Effort radial appliqué** (poids de la génératrice, accouplement et frein) :  $F_r = 500 \text{ N}$

- **Portée entre roulements (approximation) :**  $L = 300$  mm
- **Arbre plein** et de section circulaire

### 3.2. Calcul du couple transmis

$$C = \frac{9550 \cdot P}{N} = \frac{9550 \cdot 5}{1500} = 31.83 \text{ N.m} \dots (13)$$

### 3.3. Dimensionnement par torsion pure

La contrainte de torsion est donnée par la formule :

$$\tau_{\text{torsion}} = \frac{16 \cdot C}{\pi \cdot d^3} \dots (14)$$

On cherche à vérifier que cette contrainte ne dépasse pas la contrainte admissible :

$$\tau_{\text{torsion}} \leq \tau_{\text{adm}} = 145 \text{ MPa} \dots (15)$$

$$d^3 \geq \frac{16 \cdot 31.83}{\pi \cdot 145 \cdot 10^6} = 1.112 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \Rightarrow d \geq \sqrt[3]{1.112 \times 10^{-6}} = 10.34 \text{ mm}$$

### 3.4. Vérification par flexion + torsion (contraintes combinées)

a) *Moment fléchissant maximum :*

Effort radial appliqué au milieu de la portée :

$$M_f = \frac{F_r \cdot L}{4} = \frac{500 \cdot 0.3}{4} = 37.5 \text{ N.m} \dots (16)$$

b) *Contraintes de flexion et de torsion :*

- Moment quadratique:

$$W = \frac{\pi \cdot d^3}{32} \dots (17)$$

- Contraintes:

$$\sigma = \frac{M_f \cdot 32}{\pi \cdot d^3} ; \quad \tau = \frac{C \cdot 16}{\pi \cdot d^3} \dots (18)$$

c) *Contrainte équivalente de Von Mises :*

$$\sigma_{vm} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \dots (19)$$

On vérifie que :

$$\sigma_{vm} \leq \tau_{\text{adm}} = 145 \text{ MPa} \dots (20)$$

### 3.5. Application numérique pour $d = 38$ mm

- $d^3 = 0.038^3 = 5.487 \times 10^{-5} \text{ m}^3$

- $\sigma = \frac{37.5 \cdot 32}{\pi \cdot 5.487 \times 10^{-5}} = 69.54 \text{ MPa}$

- $\tau = \frac{31.83 \cdot 16}{\pi \cdot 5.487 \times 10^{-5}} = 29.48 \text{ MPa}$
- $\sigma_{vm} = \sqrt{69.54^2 + 3 \cdot 29.48^2} = \sqrt{4836.4 + 2605.3} = \sqrt{7441.7} \approx 86.28 \text{ MPa}$

→ **Conclusion** :  $\sigma_{vm} = 86.28 \text{ MPa} < \tau_{adm} = 145 \text{ MPa} \Rightarrow$  **dimension validée**

### 3.6. Choix du diamètre final

Bien que le diamètre minimal requis pour supporter la torsion soit autour de **10.3 mm**, et que les contraintes combinées soient satisfaites à **38 mm**, on retient une **majoration à 48 mm** pour :

- Uniformisation avec l'arbre d'entrée (également 48 mm) pour simplifier la fabrication.
- Assurer une rigidité suffisante en cas de déséquilibres dynamiques,
- Compatibilité directe avec les accouplements, le frein à disque et la génératrice.
- Intégration plus aisée dans la nacelle avec un encombrement homogène.
- Réduction des coûts par standardisation des outils, accouplements et montages.

## 4. Dimensionnement du multiplicateur de vitesse

### 4.1. Choix du multiplicateur de vitesse

Avant de retenir le multiplicateur planétaire comme solution de transmission entre l'arbre de rotor et la génératrice, plusieurs configurations de multiplicateurs ont été étudiées afin d'identifier celle répondant le mieux aux contraintes d'une éolienne domestique de 5 kW. Voici un aperçu des principaux systèmes envisageables :

- **Multiplicateur à engrenages cylindriques simples**  
Avantages : conception simple, usinage facile, maintenance aisée.  
Inconvénients : encombrement important pour de faibles rapports, alignement critique, couple de sortie limité. Peu adapté aux systèmes compacts [50].
- **Multiplicateur à courroie ou chaîne**  
Avantages : coût faible, simplicité mécanique, protection contre les surcharges.  
Inconvénients : glissement, pertes par frottement, faible rendement, besoin d'entretien régulier. Inadapté à un fonctionnement continu ou à haut rendement [51].
- **Système à vis sans fin**  
Avantages : fonctionnement silencieux, auto-freinage.  
Inconvénients : très mauvais rendement (souvent <50 %), échauffement important, usure rapide. Déconseillé pour transmission de puissance continue [52].
- **Multiplicateur planétaire (train épicycloïdal)**  
Avantages : compacité, forte capacité de transmission de couple, bonne répartition des efforts, rendement élevé, alignement coaxial des arbres (entrée/sortie), faible vibration.  
Inconvénients : conception plus complexe, usinage de précision requis, lubrification nécessaire [53].

**Choix retenu : multiplicateur planétaire à 6 satellites.**

Ce choix s'explique par les critères suivants :

- Besoin d'un système **compact et robuste**, bien adapté aux contraintes d'encombrement de la nacelle.
- Transmission d'un couple relativement élevé ( $\approx 72 \text{ N}\cdot\text{m}$ ) avec un **rapport de réduction précis** ( $i = 2,25$ ) pour atteindre  $1500 \text{ tr/min}$ .
- Alignement coaxial naturel des arbres d'entrée et de sortie facilitant le montage mécanique.
- Bon **rendement mécanique**, important dans une logique de minimisation des pertes d'énergie.
- Meilleure distribution des efforts sur les satellites, augmentant la durabilité [54].

#### 4.2. Présentation du système

Le multiplicateur utilisé est de type **planétaire** avec les caractéristiques suivantes :

- **Nombre de satellites**: 6
- **Pignon central (soleil)** : 96 dents, diamètre primitif 240 mm
- **Couronne interne** : 120 dents, diamètre primitif 300 mm
- **Pignons satellites** : 12 dents, diamètre primitif 30 mm
- **Rapport de transmission**:  $i = 2,25$
- **Puissance transmise à la sortie** :  $P = 5 \text{ kW}$
- **Vitesse de sortie (arbre rapide)** :  $N_s = 1500 \text{ tr/min}$
- **Vitesse d'entrée (arbre lent)** :  $N_e = \frac{1500}{2,25} \approx 667 \text{ tr/min}$

#### 4.3. Calcul du couple en entrée et en sortie

Couple transmis à la sortie :

$$C_s = \frac{P \times 60}{2\pi N_s} = \frac{5000 \times 60}{2\pi \times 1500} \approx \frac{300000}{9424,78} \approx 31,83 \text{ N}\cdot\text{m} \dots\dots (21)$$

Couple transmis à l'entrée :

$$C_e = i \times C_s = 2,25 \times 31,83 \approx 71,62 \text{ N}\cdot\text{m} \dots\dots (22)$$

#### 4.4. Répartition du couple sur les satellites

Comme il y a **6 satellites**, le couple est réparti de façon équitable. Chaque satellite transmet donc un sixième du couple.

$$C_{\text{sat}} = \frac{C_e}{6} = \frac{71,62}{6} \approx 11,94 \text{ N}\cdot\text{m} \dots\dots (23)$$

#### 4.5. Calcul de l'effort tangentiel transmis par chaque satellite

L'effort tangentiel transmis est donné par :

$$F_t = \frac{2 \cdot C_{\text{sat}}}{d_p} \dots\dots (24)$$

Où :

- $d_p$  : diamètre primitif du pignon satellite = 30 mm

$$F_t = \frac{2 \cdot 11,94}{0,03} = \frac{23,88}{0,03} = 796 \text{ N}$$

**Chaque satellite transmet un effort tangentiel de 796 N.**

#### 4.6. Calcul de la force radiale sur les paliers du porte-satellite

Les efforts tangents transmis par les satellites génèrent une réaction radiale sur l'axe du porte-satellite. La résultante radiale est la somme vectorielle des efforts tangents des 6 satellites.

Sachant que les efforts sont répartis uniformément (positionnés à  $60^\circ$ ), la résultante est :

$$F_r = 2 \cdot F_t \cdot \cos\left(\frac{180}{n_s}\right) = 2 \cdot 796 \cdot \cos(30^\circ) \dots\dots (25)$$

$$F_r \approx 2 \cdot 796 \cdot 0,866 \approx 1379 \text{ N}$$

**Effort radial total transmis au porte-satellite  $\approx 1379$  N.**

#### 4.7. Vérification du rapport de transmission

Le rapport de transmission d'un train planétaire à couronne fixe est donné par :

$$i = 1 + \frac{Z_c}{Z_s} = 1 + \frac{120}{96} = 1 + 1,25 = 2,25 \dots\dots (26)$$

**Le rapport obtenu est conforme à la valeur souhaitée.**

#### 4.8. Détermination du module (indicatif)

Sans entrer dans la vérification complète des dentures ici, on peut donner une estimation du module en utilisant les diamètres primitifs :

$$m = \frac{d}{z} \dots\dots (27)$$

- Pour le soleil :  $m = \frac{240}{96} = 2,5 \text{ mm}$
- Pour le satellite :  $m = \frac{30}{12} = 2,5 \text{ mm}$
- Pour la couronne :  $m = \frac{300}{120} = 2,5 \text{ mm}$

Le module est **constant**, ce qui garantit un engrenement correct entre les roues.

**4.9. Conclusion**

Le multiplicateur de vitesse planétaire conçu respecte :

- Le rapport de transmission souhaité (2.25)
- Une bonne répartition des efforts sur les satellites (6 pignons)
- Des efforts tangents réalistes pour un entraînement de 5 kW
- Des efforts radiaux raisonnables pour la conception du porte-satellite
- Une cohérence dimensionnelle pour les dentures (module constant de 2,5 mm)

**Chapitre III :**  
**Conception assistée par**  
**ordinateur de l'éolienne sur**  
**SolidWorks**

## 1. Présentation du logiciel SolidWorks

SolidWorks est un logiciel de conception assistée par ordinateur (CAO) développé par Dassault Systèmes. Il permet la création de pièces mécaniques, d'assemblages complexes et de plans techniques en deux dimensions à partir de modèles 3D. Il offre des outils puissants pour la modélisation paramétrique, la simulation, le rendu, et la vérification d'interférences.

Ce logiciel est particulièrement adapté aux projets d'ingénierie mécanique comme celui de la conception d'une éolienne, car il permet une représentation fidèle des composants, leur interaction mécanique et la génération automatique des plans de fabrication.

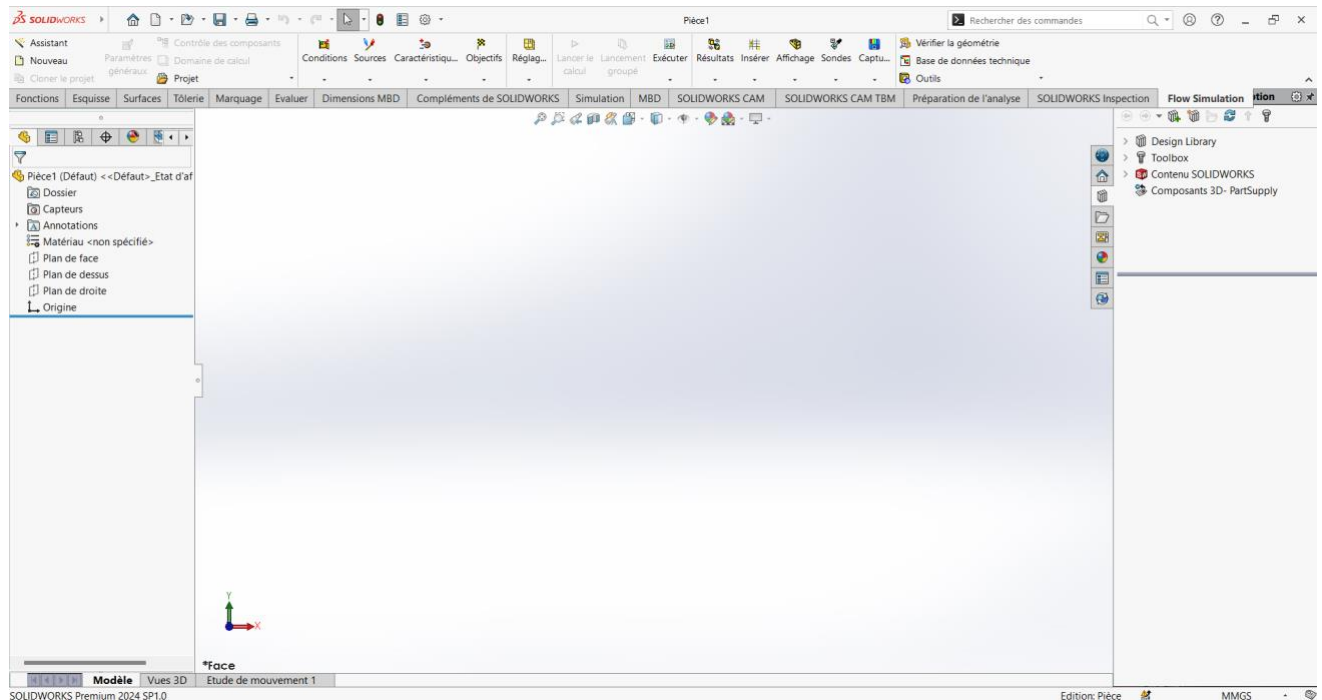


Figure III.1 Interface du logiciel SOLIDWORKS

## 2. Conception des composants principaux

### 2.1. Pales

#### Conception des pales de l'éolienne

La modélisation des pales constitue une étape essentielle dans la conception d'une éolienne, car leur forme et leur profil influencent directement les performances aérodynamiques du rotor. Dans notre cas, les pales sont conçues à partir du profil **NACA 4412**, reconnu pour sa portance élevée et sa stabilité dans des régimes de vents variés.

#### Importation du profil NACA

La première étape consiste à importer le fichier de coordonnées du profil NACA 4412 dans SolidWorks à l'aide de la fonction *courbe par coordonnées*. Cette opération permet de tracer avec précision le contour du profil aérodynamique (voir **Figure III.2**), qui sera ensuite utilisé comme base pour la création des sections de la pale.

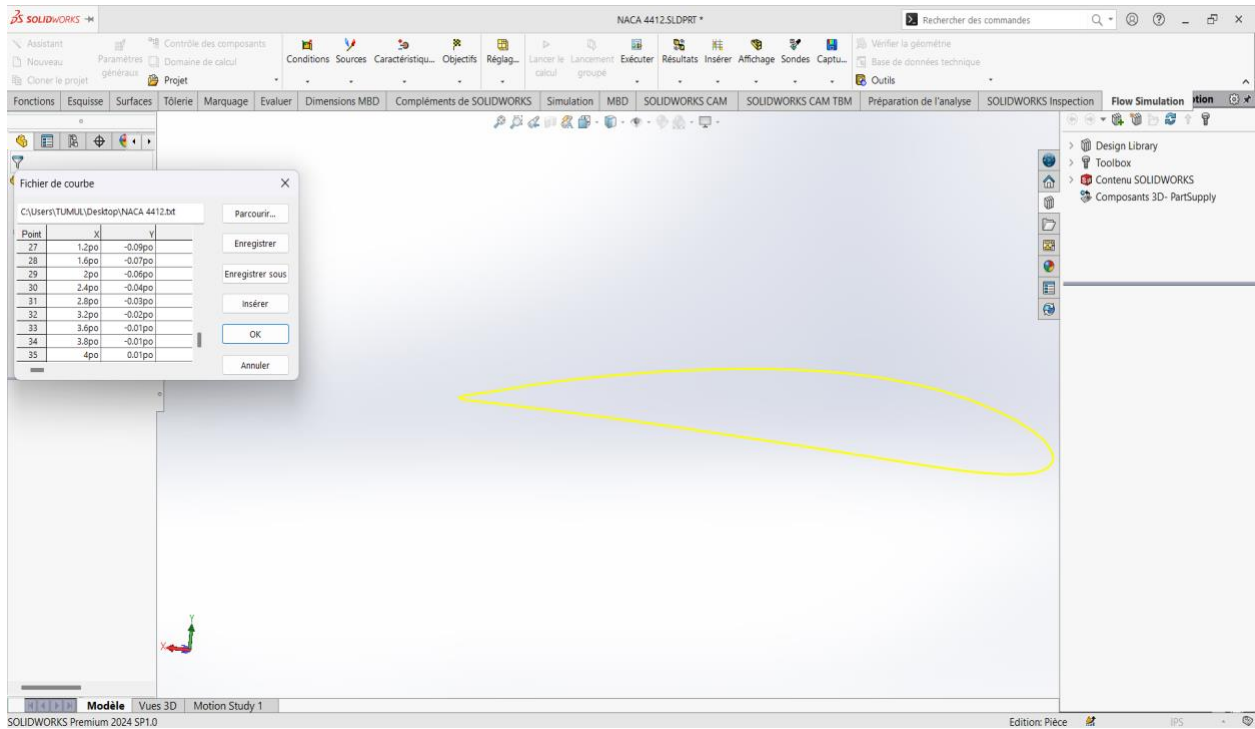


Figure III.2 Importation du profil NACA 4412 sous forme de courbe

### Création des sections de la pale

Plusieurs esquisses sont réalisées le long de la longueur de la pale pour en définir la variation de forme. Chaque esquisse correspond à une coupe transversale basée sur le profil NACA, mais à différentes échelles. Ces profils sont positionnés sur des plans espacés régulièrement selon la longueur de la pale (voir Figure III.3 à III.5), ce qui permet de générer une géométrie tridimensionnelle par **lissage** (fonction *Loft* dans SolidWorks).

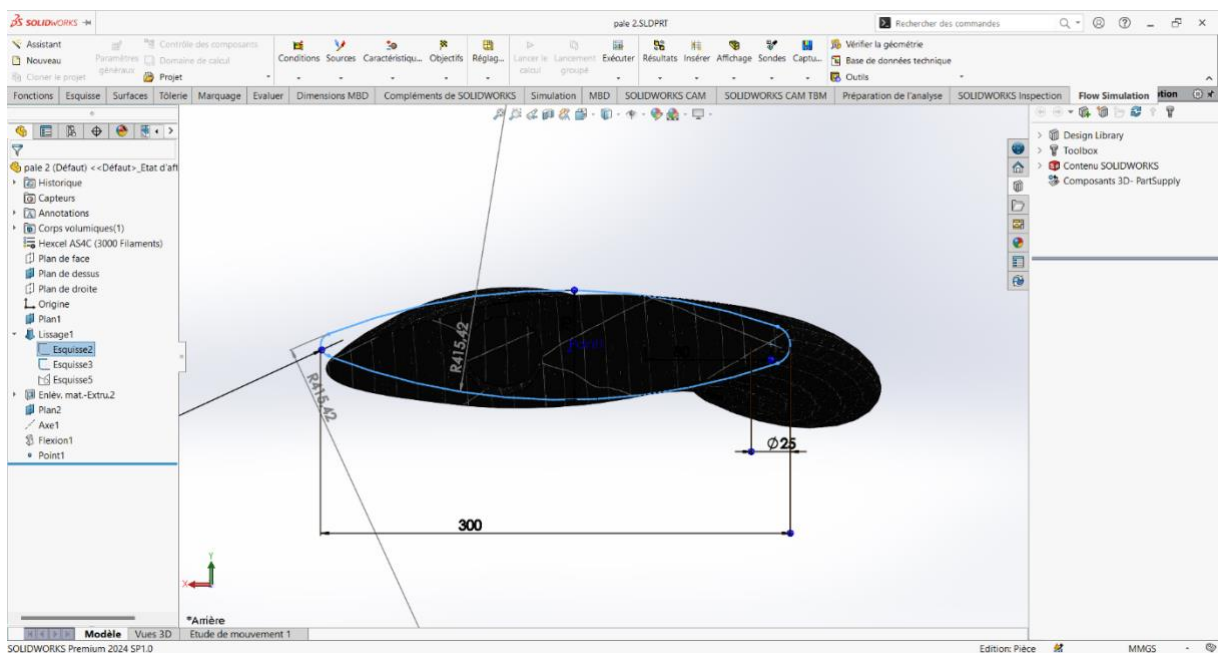


Figure III.3 Profil d'attaque de la pale (esquisse à la base)

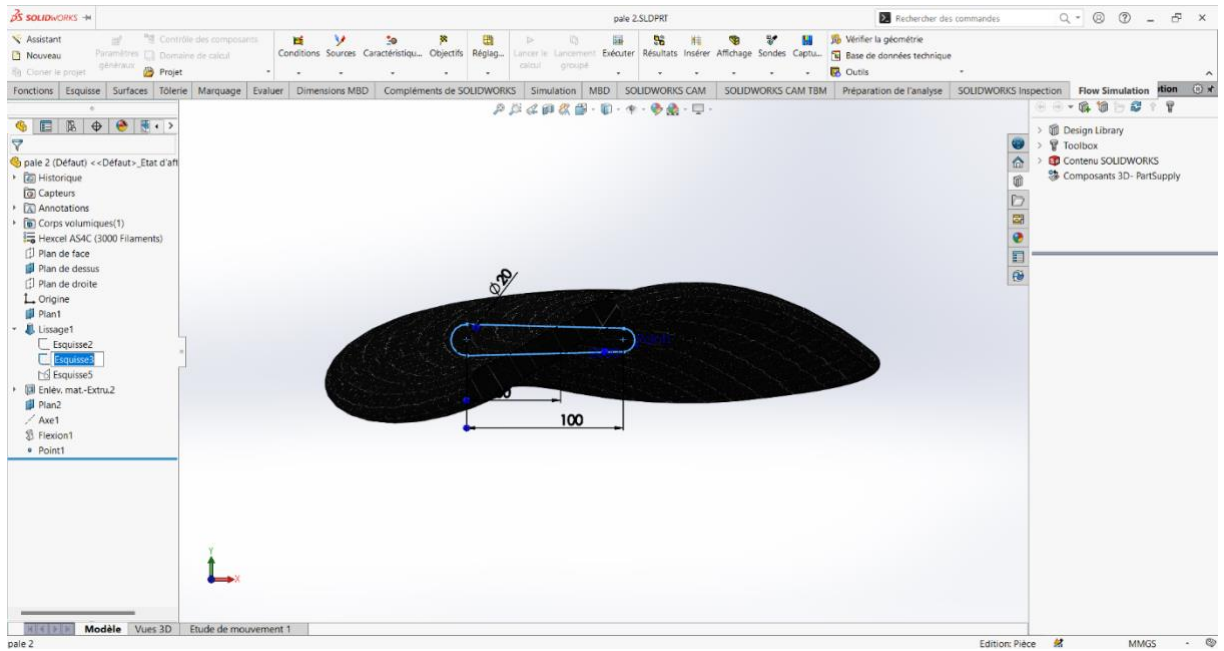


Figure III.4 Profil intermédiaire avec ajustement de la corde et du diamètre intérieur

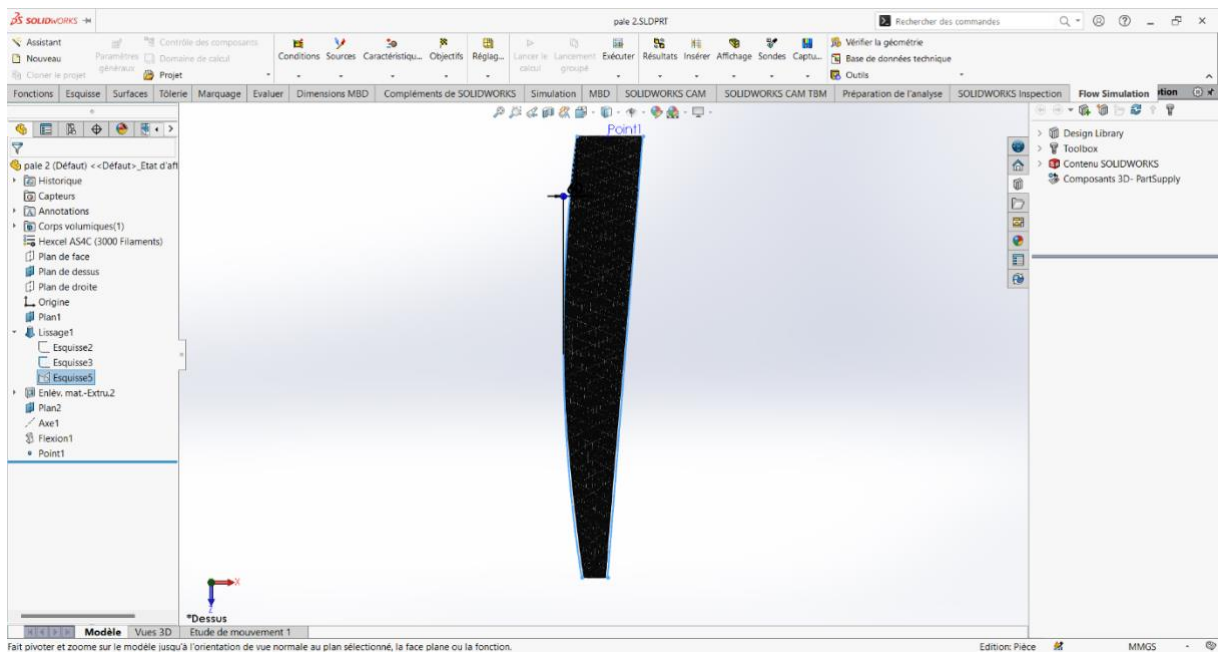


Figure III.5 Profil en bout de pale

**Création du trou de fixation**

Un perçage est effectué à la base de la pale pour permettre son montage sur le moyeu (voir **Figure III.6**). Ce trou est dimensionné à Ø50 mm, positionné à une distance précise pour assurer un équilibrage optimal du rotor et une fixation rigide avec l'arbre d'entrée via un axe ou un boulonnage.

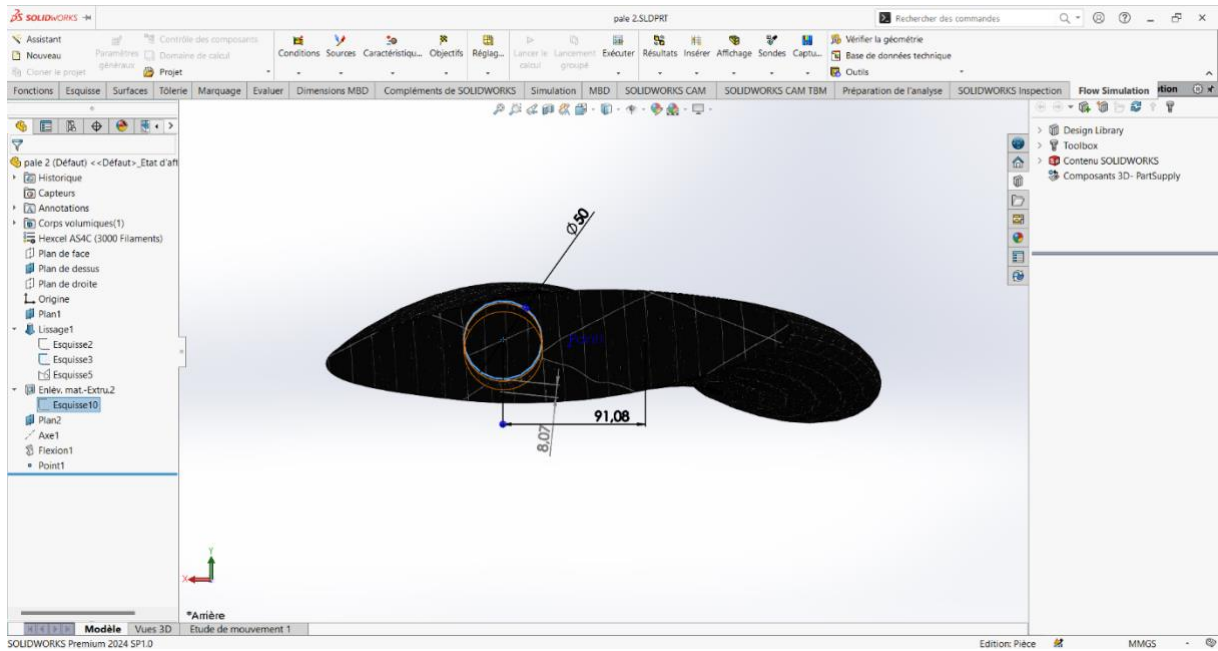


Figure III.6 Détail du trou de fixation à la base de la pale

### Application de la torsion et inclinaison

Pour reproduire l'angle d'attaque variable le long de la pale, une **fonction de flexion** est appliquée avec une inclinaison de 35° (voir **Figure III.7**). Cette opération est essentielle pour optimiser la captation du vent sur l'ensemble de la surface balayée. L'effet de torsion est intégré en respectant les critères aérodynamiques nécessaires pour la génération de portance.

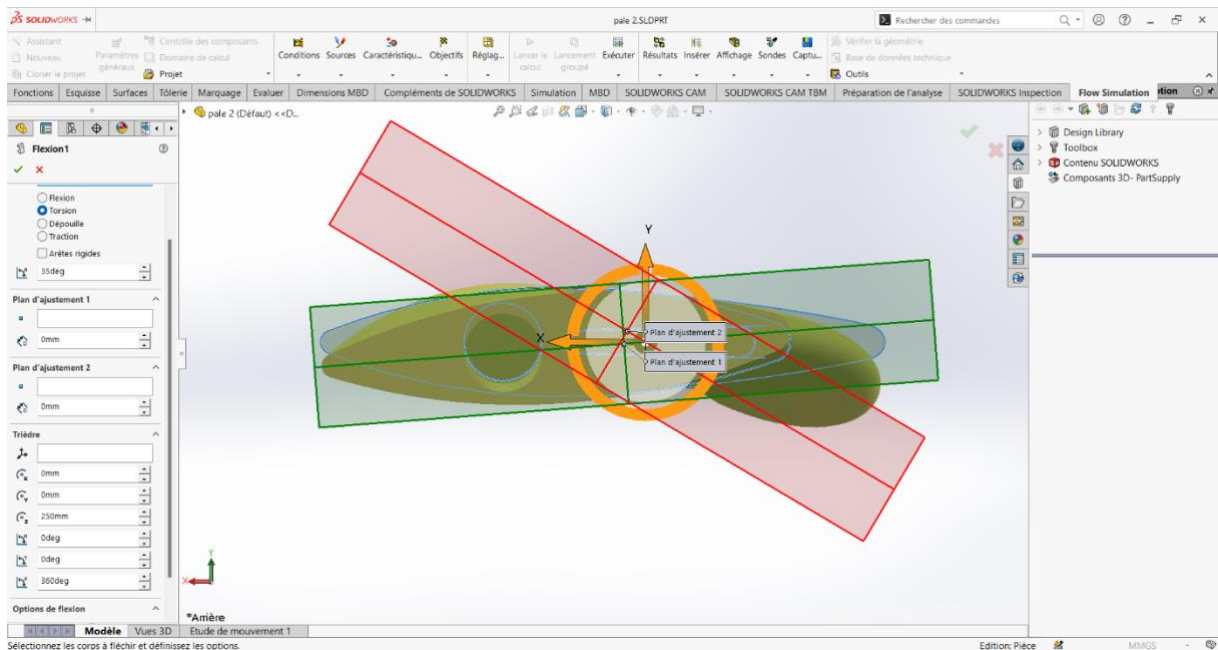


Figure III.7 Application de la flexion de la pale à l'aide de la fonction de déformation

## 2.2.Moyeu

### Conception du moyeu sur SolidWorks

Le moyeu constitue la pièce centrale qui relie les pales de l'éolienne à l'arbre d'entrée. Il doit garantir une fixation fiable des pales, tout en assurant un bon alignement mécanique et une transmission efficace du couple aérodynamique vers l'arbre. Sa conception a été réalisée sur le logiciel SolidWorks en tenant compte des dimensions des pales et des efforts transmis.

#### Définition du plan de travail

La conception débute par la création d'un plan de référence à l'aide de l'outil « Plan » dans SolidWorks. Celui-ci sert de base pour tracer l'esquisse circulaire représentant la face frontale du moyeu. Le diamètre initial de 280 mm a été choisi pour assurer un équilibre entre résistance mécanique et masse (voir Figure III.8).

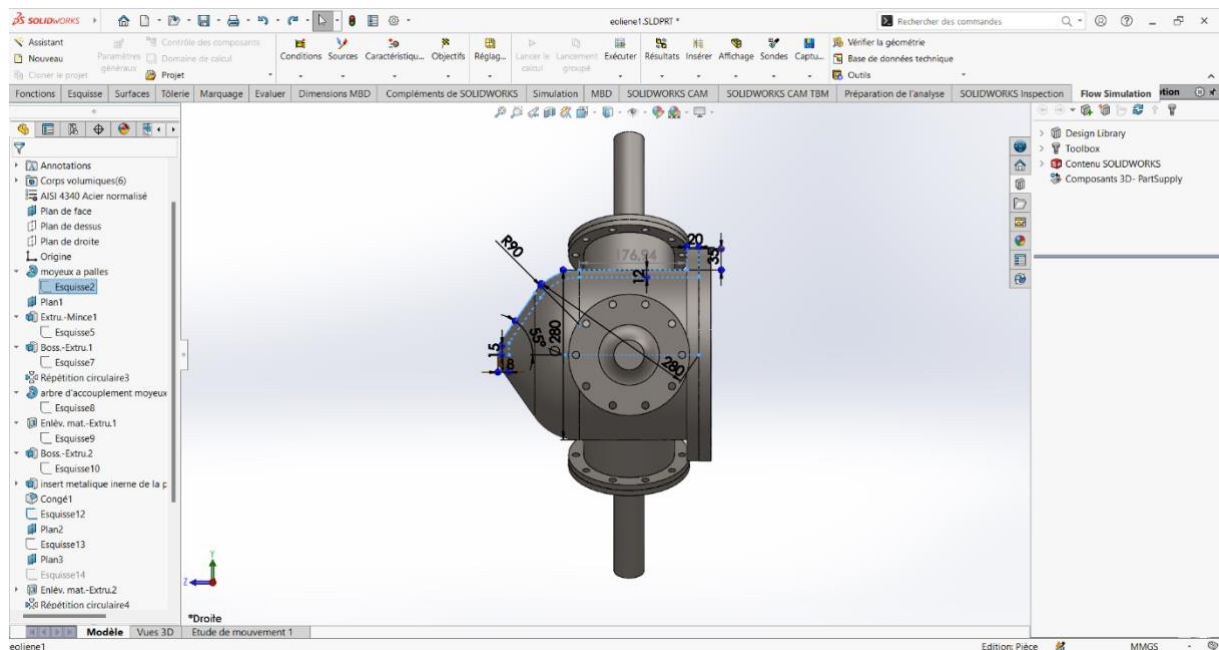


Figure III.8 Base du moyeu créée par bossage avec révolution

#### Création du volume principal

L'esquisse circulaire est ensuite extrudée sur une distance de 150 mm afin de former le volume de base du moyeu. Ce volume représente la zone où seront fixées les pales ainsi que l'arbre d'entrée (voir Figure III.9).

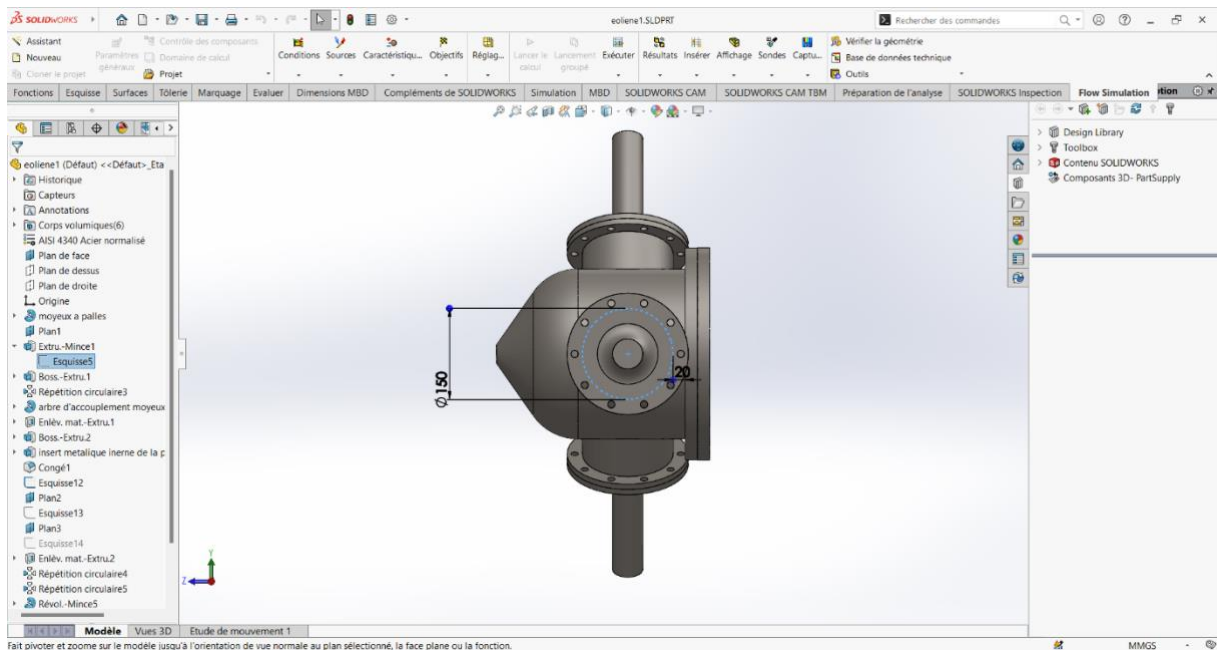


Figure III.9 Extrusion

## Ajout des perçages de fixation des pales

Pour assurer la fixation des pales, trois perçages équidistants ont été réalisés à l'aide de l'outil « Répétition circulaire ». Une première esquisse représentant un trou de  $\varnothing 25$  mm est placée sur un rayon de 100mm. Cette esquisse est ensuite dupliquée trois fois à  $120^\circ$  (voir Figure III.10 et III.11).

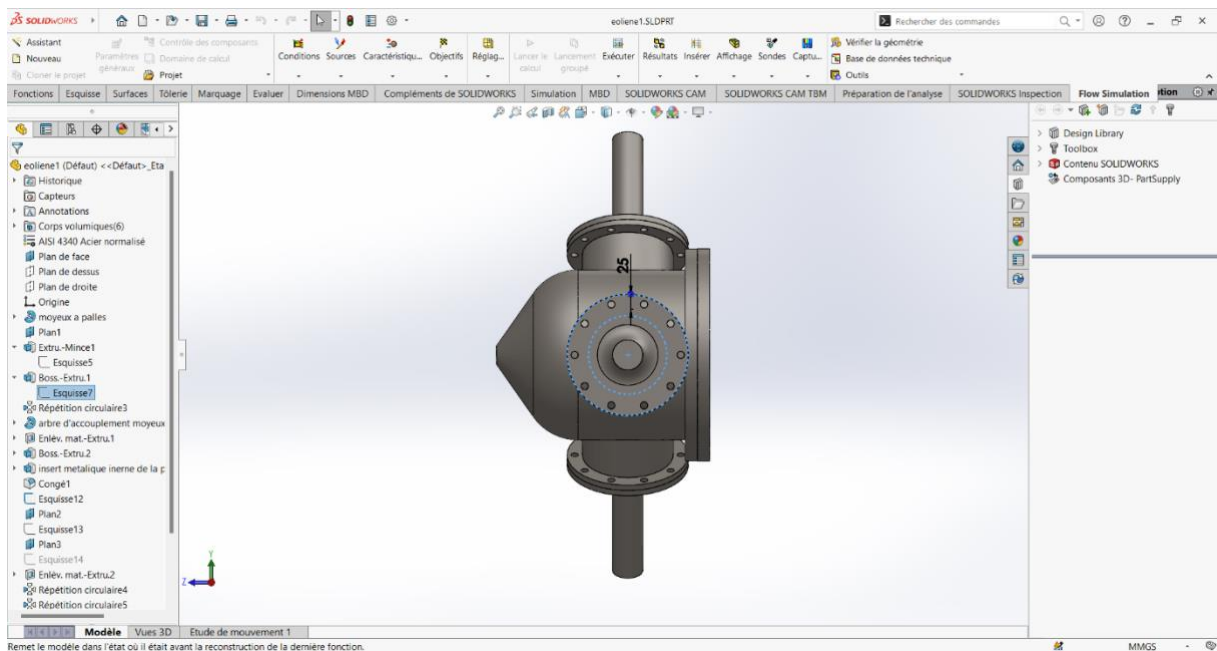


Figure III.10 Perçages de fixation des pales

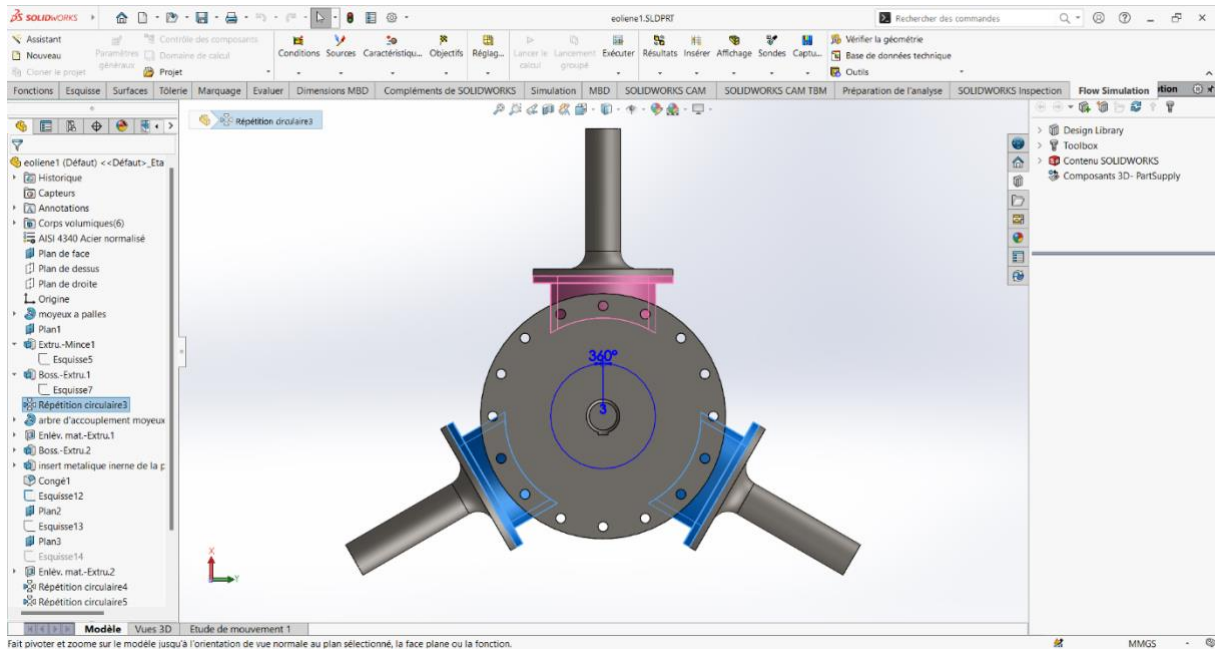


Figure III.11 Répartition circulaire des supports de pale

### Ajout de la fixation de l'arbre d'entrée

Un perçage axial de  $\varnothing 48$  mm est effectué au centre du moyeu pour accueillir l'arbre d'entrée (voir Figure III.12). Ce trou est dimensionné pour permettre un ajustement serré avec l'arbre, assurant une transmission efficace du couple.

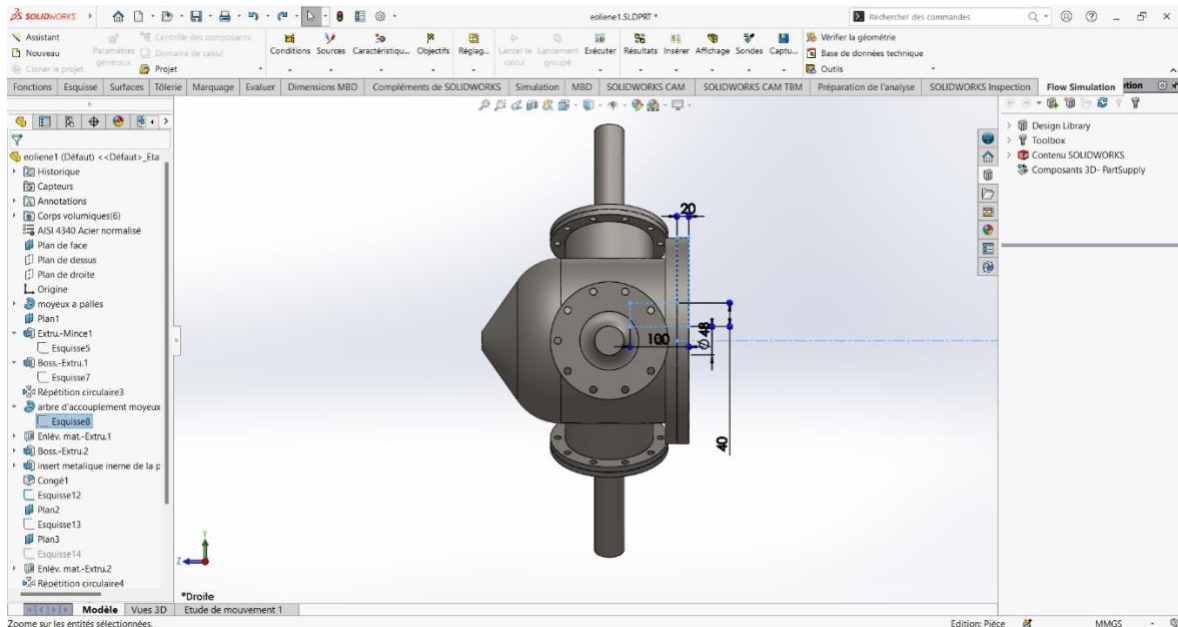


Figure III.12 fixation de l'arbre d'entrée

### Insertion des taraudages pour boulons

Autour du perçage central, une série de 16 trous de  $\varnothing 14$  mm est répartie circulairement pour accueillir les boulons de liaison avec la bride de l'arbre (voir Figure III.13). Cette liaison est cruciale pour éviter tout glissement lors des sollicitations.

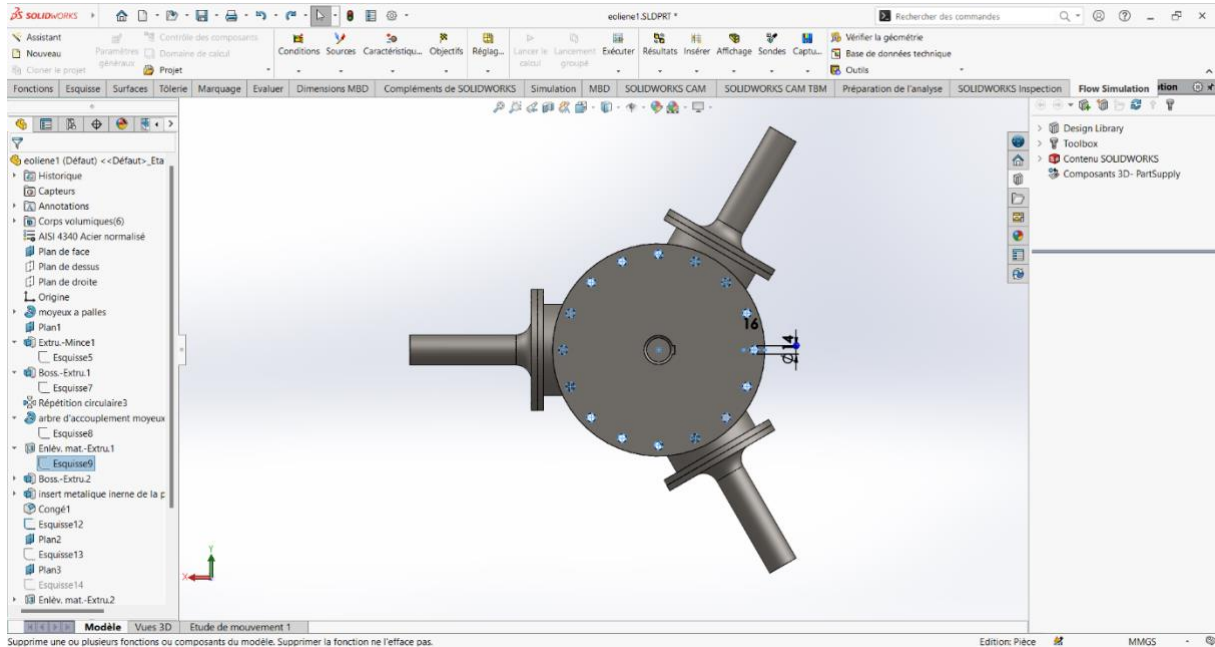


Figure III.13 Taraudages

### 2.3. Arbre d'entrée

L'arbre d'entrée (arbre lent) relie le moyeu au multiplicateur de vitesse. Il est dimensionné pour transmettre le couple de 71.5 N.m à 668 tr/min, et a été conçu en acier inoxydable AISI 316, avec un diamètre retenu de 48 mm pour assurer la sécurité face aux contraintes de torsion et flexion combinées.

#### Modélisation de la géométrie de base

La première étape de conception a consisté à créer un arbre cylindrique de 48 mm de diamètre et 500 mm de longueur à l'aide de la fonction "**Bossage/Base extrudé**". Ces dimensions ont été fixées sur la base des calculs de dimensionnement détaillés dans le chapitre précédent, incluant les contraintes mécaniques admissibles et les facteurs de sécurité.



## 2.4. Multiplicateur de vitesse

Le multiplicateur est de type planétaire, avec :

- Un pignon soleil de 96 dents ( $\varnothing$  240 mm),
- 6 satellites de 12 dents ( $\varnothing$  30 mm),
- Une couronne interne de 120 dents ( $\varnothing$  300 mm),
- Un rapport de transmission de 2.25.

L'assemblage du système a été fait avec précision pour garantir un alignement parfait et un jeu fonctionnel acceptable entre les dentures.

- **Conception du porte-satellites**

Le porte-satellites est un élément central du multiplicateur planétaire, jouant le rôle de support pour les axes des engrenages satellites. Sa conception doit garantir à la fois robustesse mécanique et précision d'alignement.

### Esquisse du profil et révolution

La première étape consiste à créer l'esquisse du demi-profil du porte-satellites, comprenant le disque intérieur d'un diamètre de 78 mm et le support cylindrique de 48 mm (voir **Figure III.16**). La largeur totale est de 88,10mm. Cette esquisse est ensuite utilisée dans la fonction **révolution** pour générer la géométrie axiale complète.

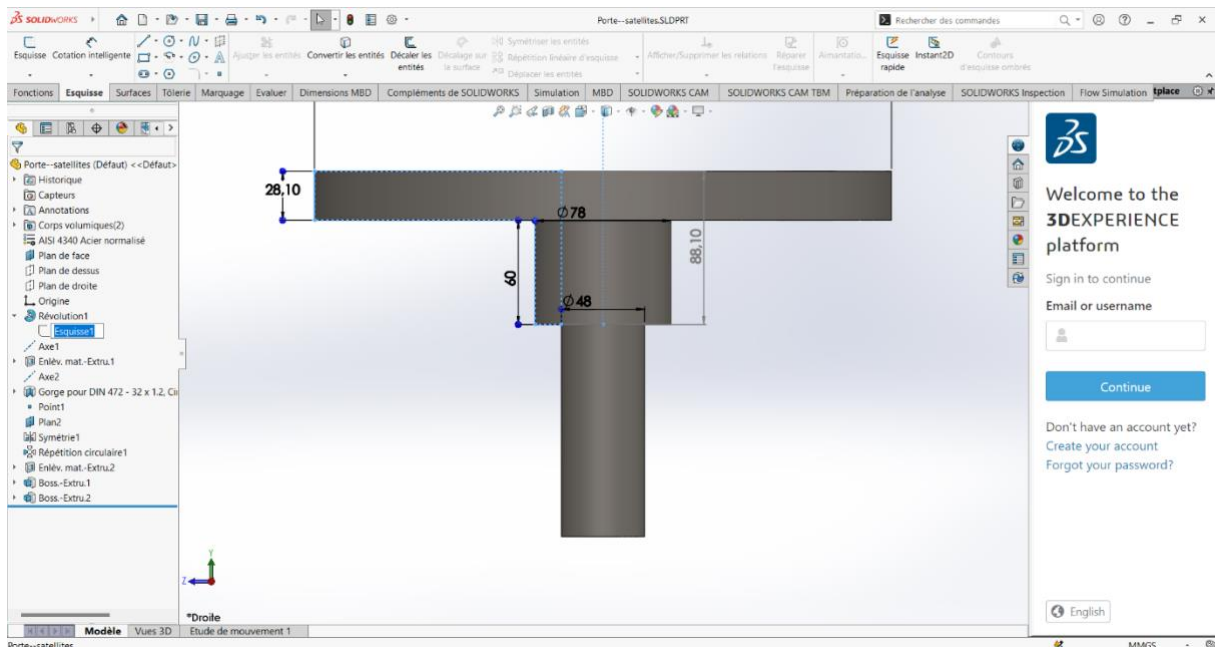


Figure III.16 Esquisse du profil axial du porte-satellites

Perçage des logements des axes satellites

Une seconde esquisse est ajoutée sur la face supérieure pour dessiner un perçage de diamètre 32 mm, réparti en 6 logements équidistants selon un cercle de 270 mm de diamètre (voir Figure III.17). Ces perçages accueilleront les axes des engrenages satellites.

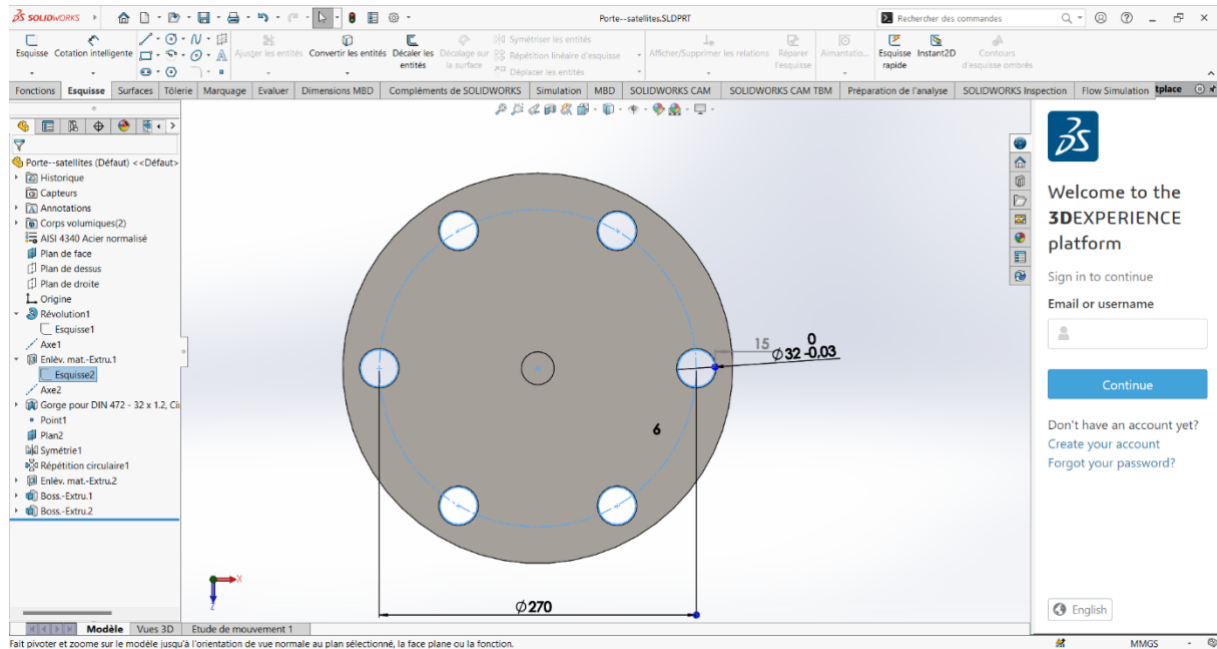


Figure III.17 Répartition des logements des axes satellites

Application de la répétition circulaire

La fonction **répétition circulaire** est ensuite appliquée pour dupliquer le perçage initial autour de l'axe central du porte-satellites, en six occurrences (voir Figure III.18). Cela assure une distribution symétrique des satellites.

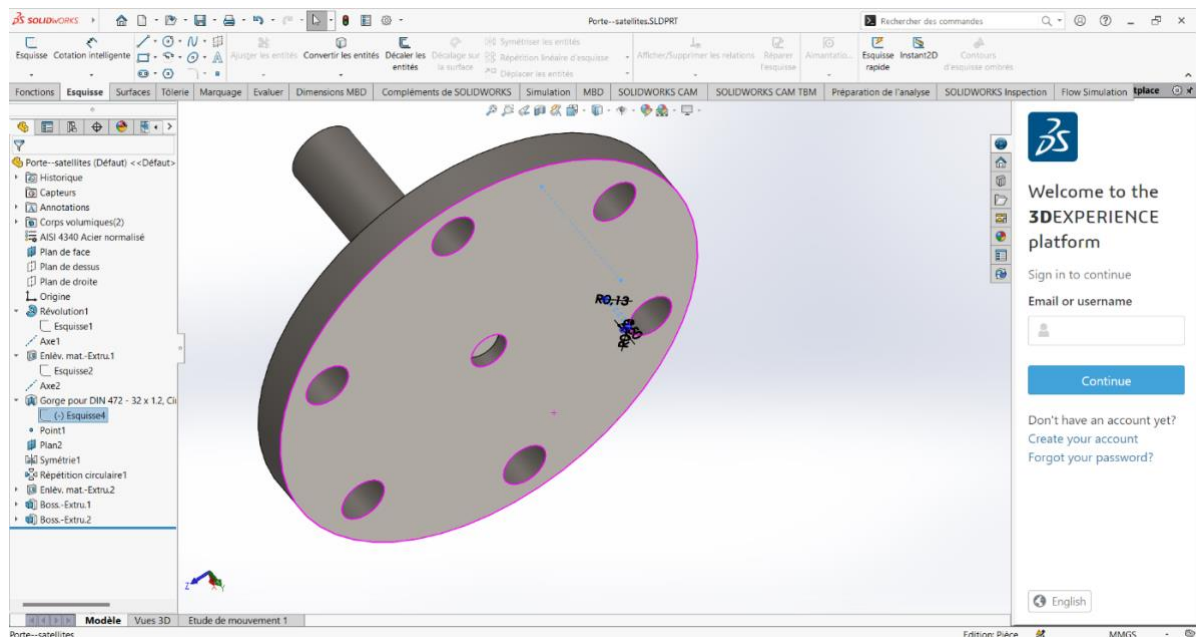


Figure III.18 Répétition circulaire des perçages sur la face du porte-satellites

- **Modélisation de la coque du multiplicateur**

La coque du multiplicateur constitue l'enveloppe externe servant à protéger les éléments mécaniques internes tels que les engrenages planétaires. Elle assure également l'alignement et le maintien rigide des composants en fonctionnement.

### Esquisse du profil de base

La première étape de la conception consiste à tracer l'esquisse de révolution qui définit la géométrie de base de la coque. On y observe la structure cylindrique creuse d'un diamètre intérieur de  $\text{Ø}330$  mm (voir Figure III.19).

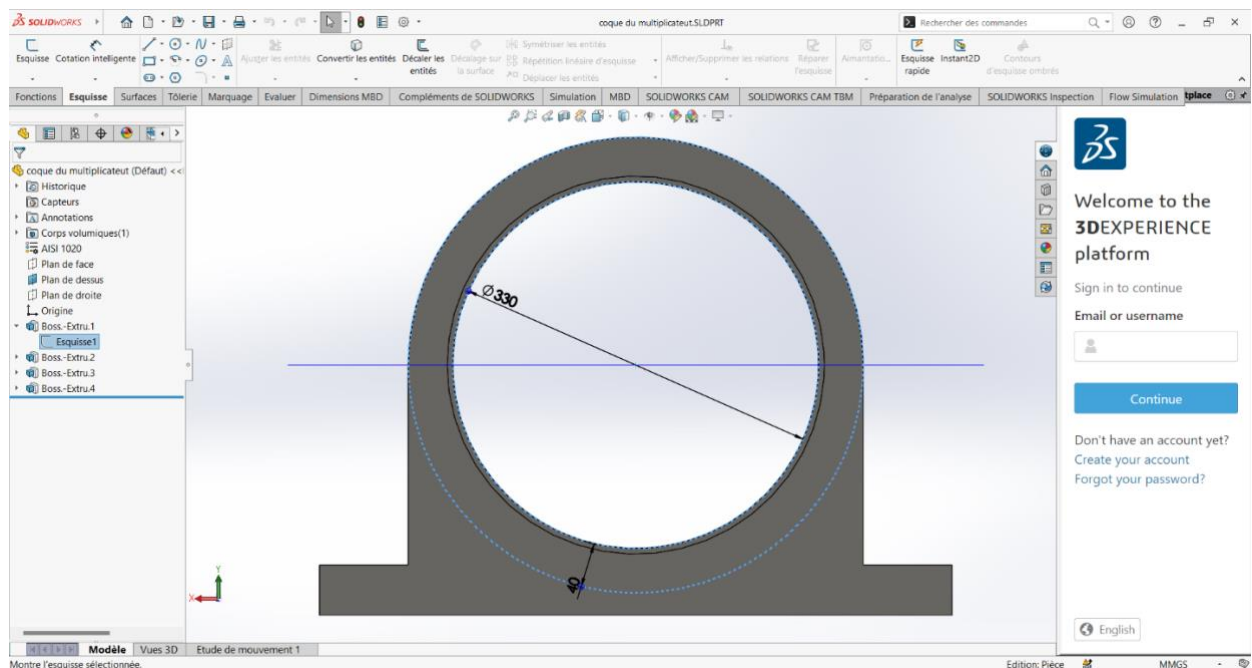


Figure III.19 Esquisse du diamètre intérieur

### Épaisseur de la paroi externe

Une seconde esquisse est utilisée pour générer l'épaisseur de la paroi externe par extrusion. Le diamètre externe est ici élargi à  $\text{Ø}340$  mm (voir Figure III.20), conférant une épaisseur uniforme de 5 mm pour garantir une bonne résistance mécanique tout en limitant le poids.

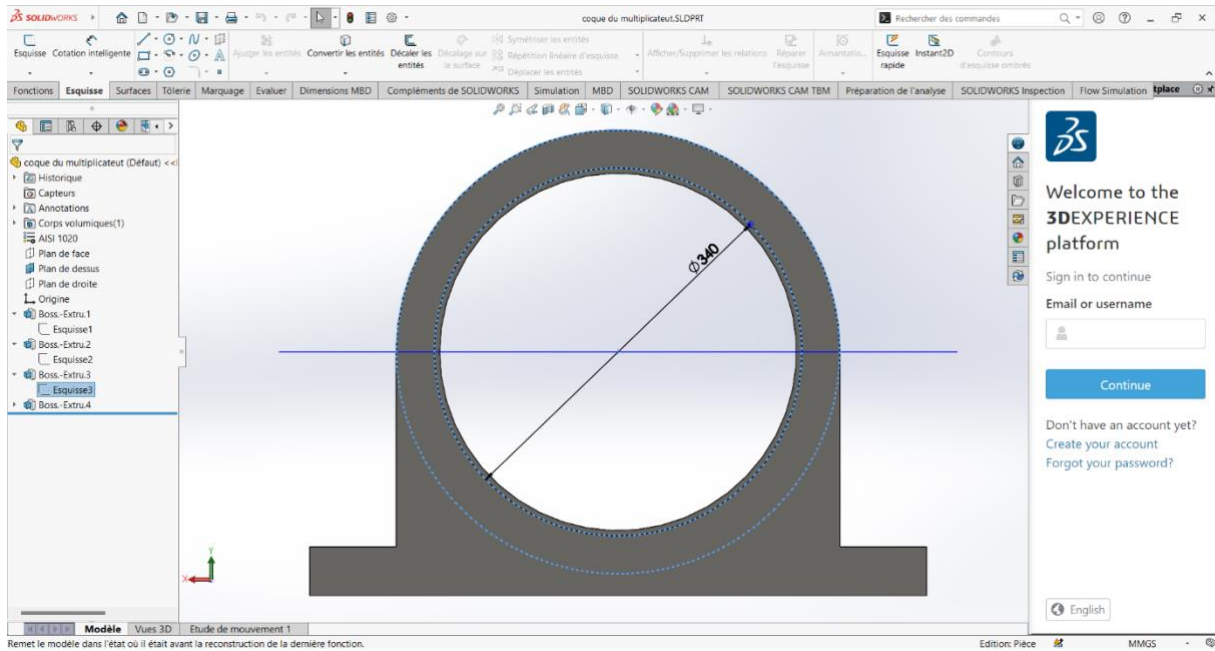


Figure III.20 Début de la paroi externe de renfort

### Ajout des pieds de fixation

Pour assurer la fixation de la coque sur une base stable, deux pieds sont extrudés de part et d'autre de la base (**voir Figure III.21**). Chaque pied est dimensionné à 80 mm de largeur et 45 mm de hauteur, formant un support robuste pour la pose de la coque sur un châssis ou une platine.

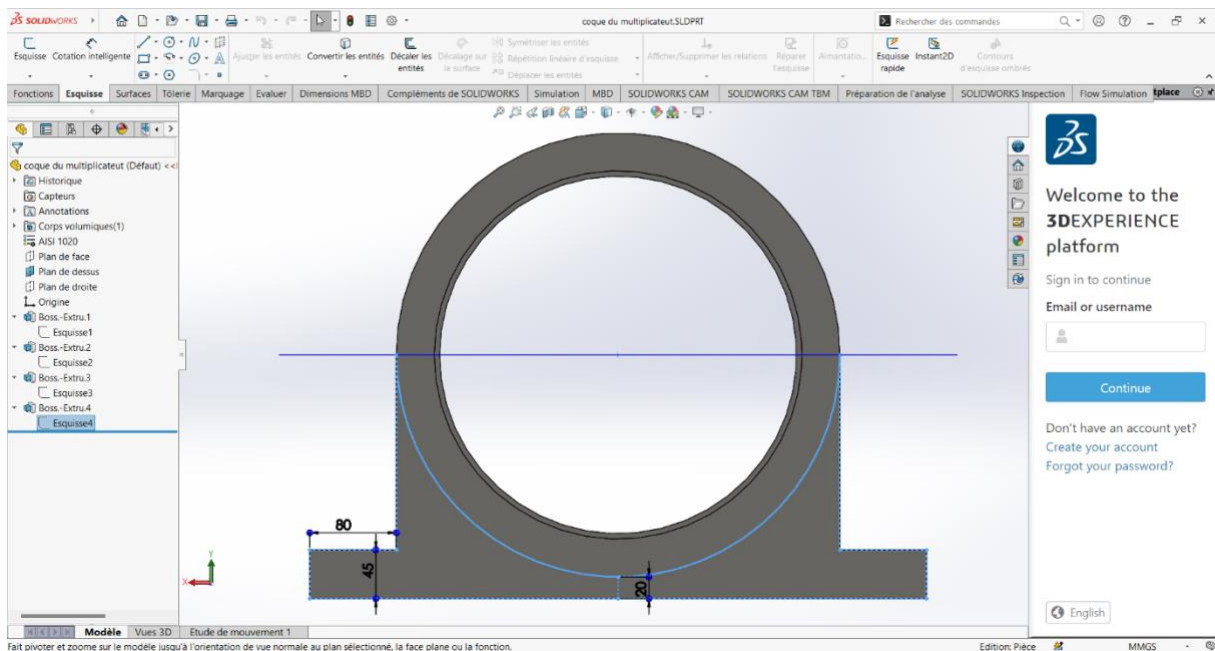


Figure III.21 Création des supports de fixation

### Importation du pignon solaire

Le pignon central, appelé **pignon solaire**, a été importé depuis la bibliothèque SolidWorks (DIN – Spur gear 2.5M 96T 20PA). Il comporte 96 dents, un module de 2.5 mm, une largeur de denture de 15 mm et un alésage de Ø48 mm avec rainure de clavette (**voir Figure III.22**).

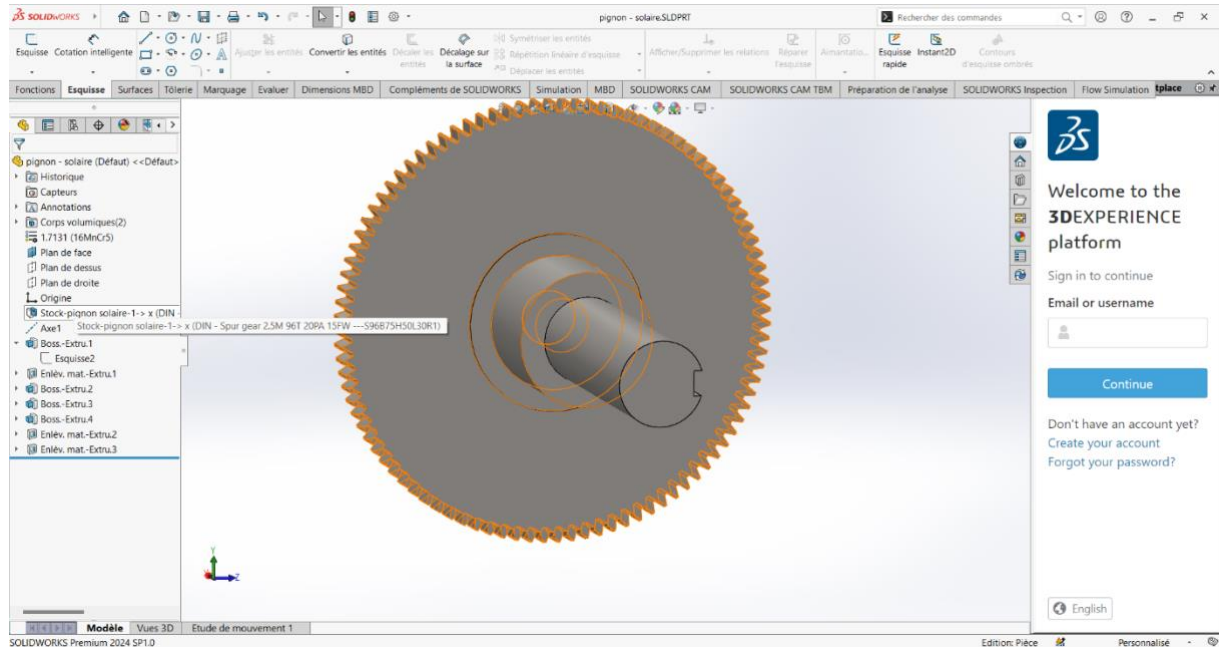


Figure III.22 Pignon solaire

### Importation des pignons satellites

Les satellites sont également issus de la bibliothèque standard (DIN – Spur gear 2.5M 12T 20PA). Ils présentent un module de 2.5 mm, 12 dents, un alésage de Ø12 mm avec gorge de circlip pour montage sur axe (**voir Figure III.23**). Six satellites sont assemblés autour du pignon solaire sur le porte-satellites.

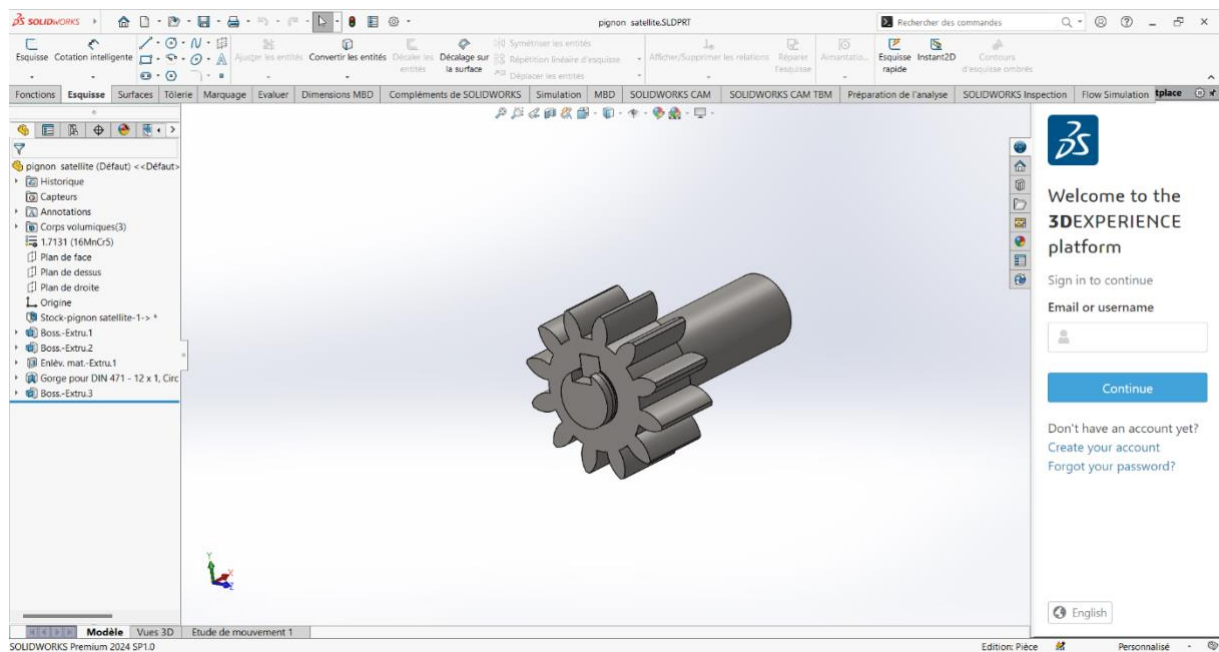


Figure III.23 Modèle 3D du pignon satellite

### Importation de la couronne à denture interne

La couronne interne (DIN – Internal spur gear 2.5M 120T 20PA) contient 120 dents avec une denture interne. Elle est importée et positionnée de manière concentrique autour des satellites et du pignon solaire. Le module reste de 2.5 mm, et le diamètre primitif avoisine les 300 mm (voir Figure III.24).

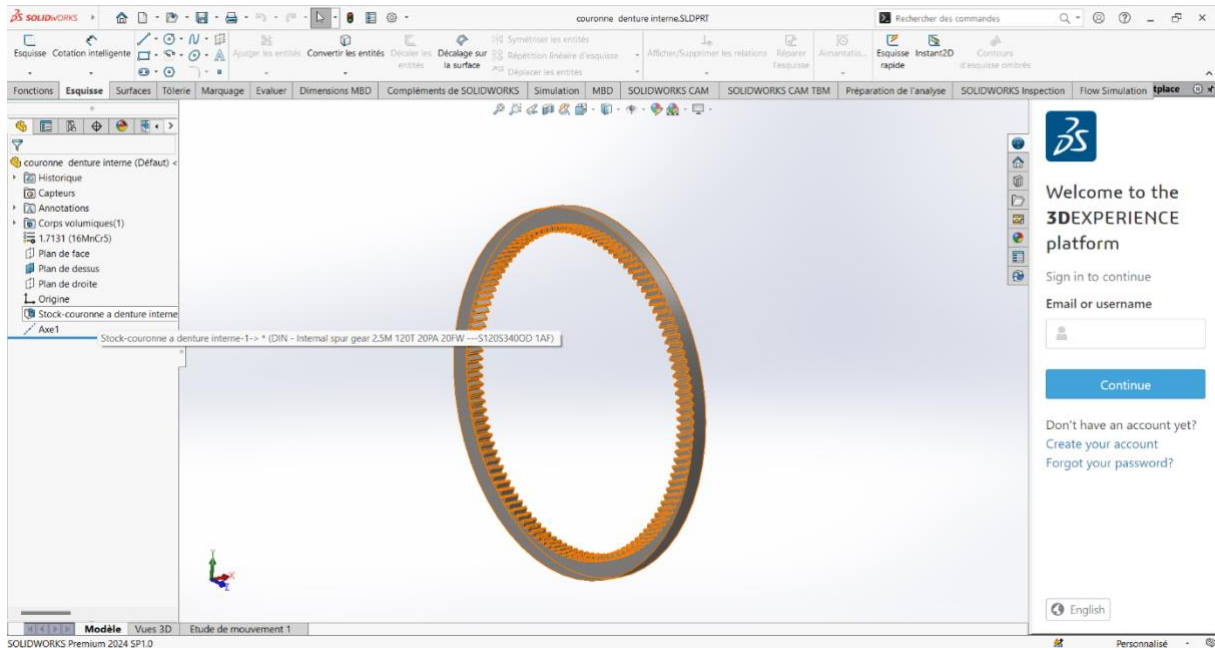


Figure III.24 Couronne à denture interne

### 2.5. Arbre de sortie

L'arbre de sortie (arbre rapide) transmet une puissance de 5 kW à la génératrice à 1500 tr/min. Il est aussi en acier inoxydable AISI 316 avec un diamètre de 48 mm, justifié par les efforts de torsion et radiaux dus au frein et à la génératrice.

La modélisation de l'arbre de sortie a été réalisée selon le même procédé que celui de l'arbre d'entrée. Il présente les mêmes caractéristiques géométriques et mécaniques, à l'exception de la **longueur totale qui est réduite à 300 mm** (contre 500 mm pour l'arbre d'entrée), afin de s'adapter à l'espace disponible entre le multiplicateur de vitesse et la génératrice.

## 2.6. Frein à disque

### Conception du système de freinage mécanique

Dans le but de garantir la sécurité et le contrôle de l'éolienne en cas de vent fort ou lors de la maintenance, un système de freinage mécanique à disque a été intégré. Il est positionné entre la génératrice et le multiplicateur de vitesse afin de bloquer le système de rotation lorsque nécessaire.

### Création du disque de frein principal

La pièce centrale du système de freinage est un disque de  $\varnothing 240$  mm, avec une épaisseur principale de 180 mm. Il est conçu via une révolution à partir d'une esquisse comprenant plusieurs diamètres internes et externes, notamment un alésage central de  $\varnothing 48$  mm pour l'arbre moteur (voir Figure III.25).

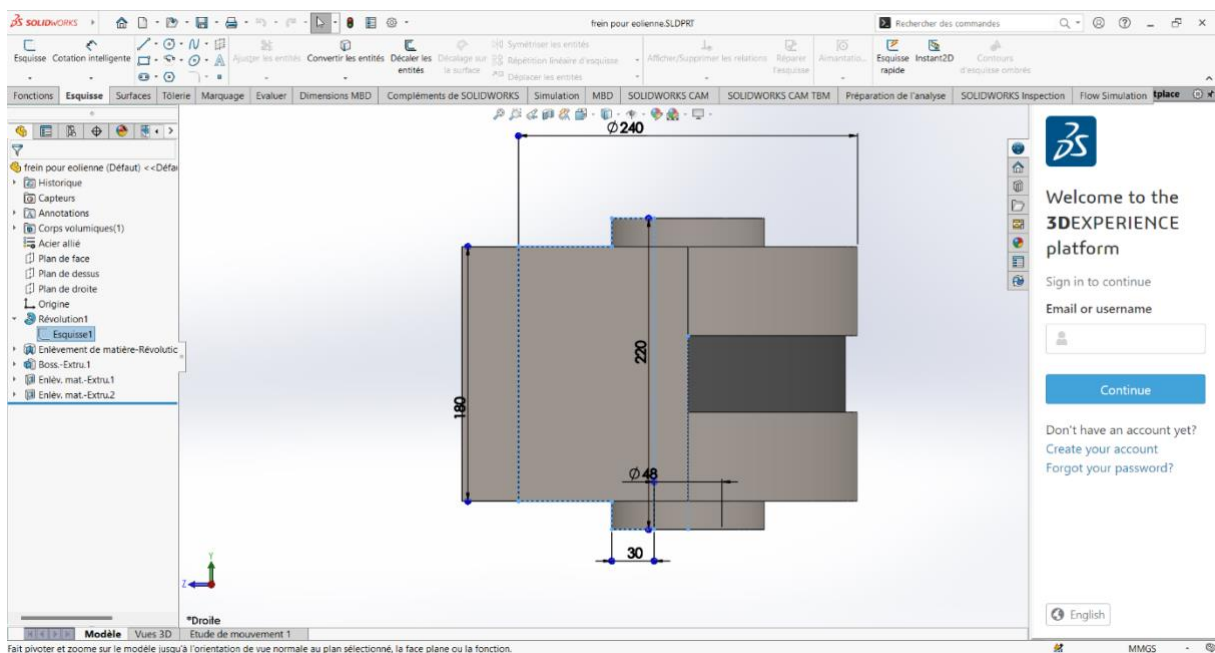


Figure III.25 Vue de l'esquisse de base du disque de frein (révolution)

### Création du support du frein

Le support du disque, conçu en acier allié, présente une base élargie de 400 mm de long et 80 mm de large avec une forme en « oreille » pour stabiliser la fixation (voir Figure III.26). La hauteur totale est de 160 mm. Un alésage central de  $\varnothing 50$  mm avec rainure de clavette permet l'assemblage sur l'arbre.

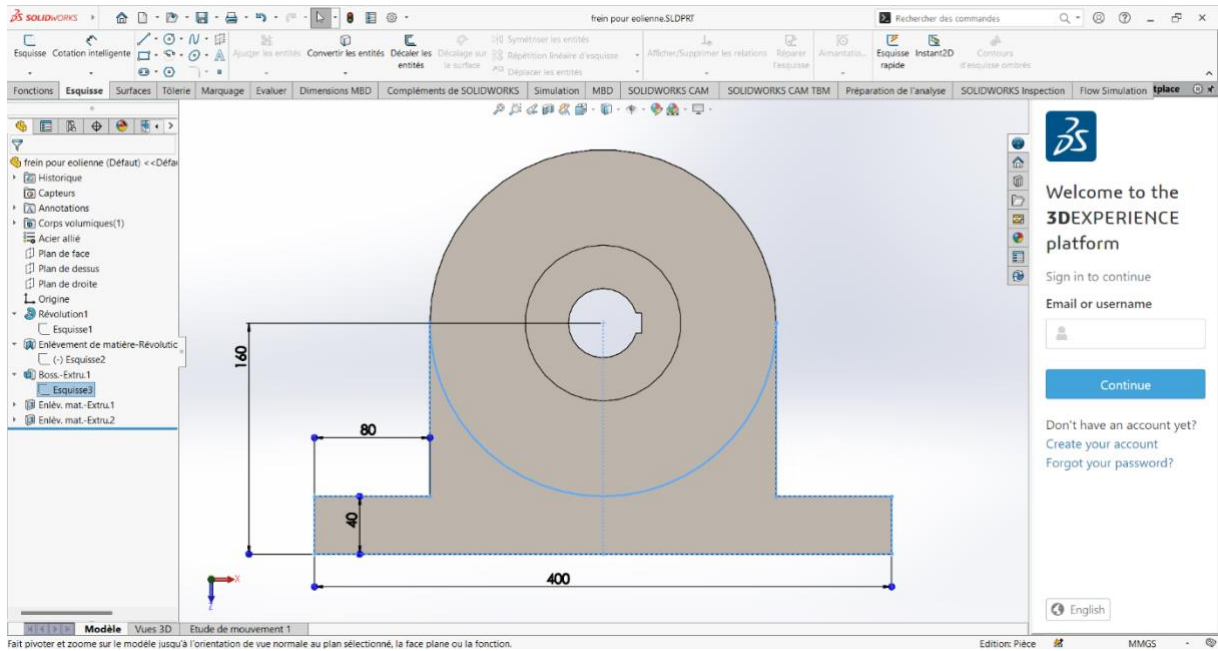


Figure III.26 Création de la base support du disque de frein

### Ajout de la rainure de clavette

Une rainure de clavette de 8 mm de large est créée à l'aide de l'outil d'enlèvement de matière par extrusion pour permettre un couplage rigide entre le disque et l'arbre de rotation (voir **Figure III.27**). Cela empêche tout glissement lors du freinage.

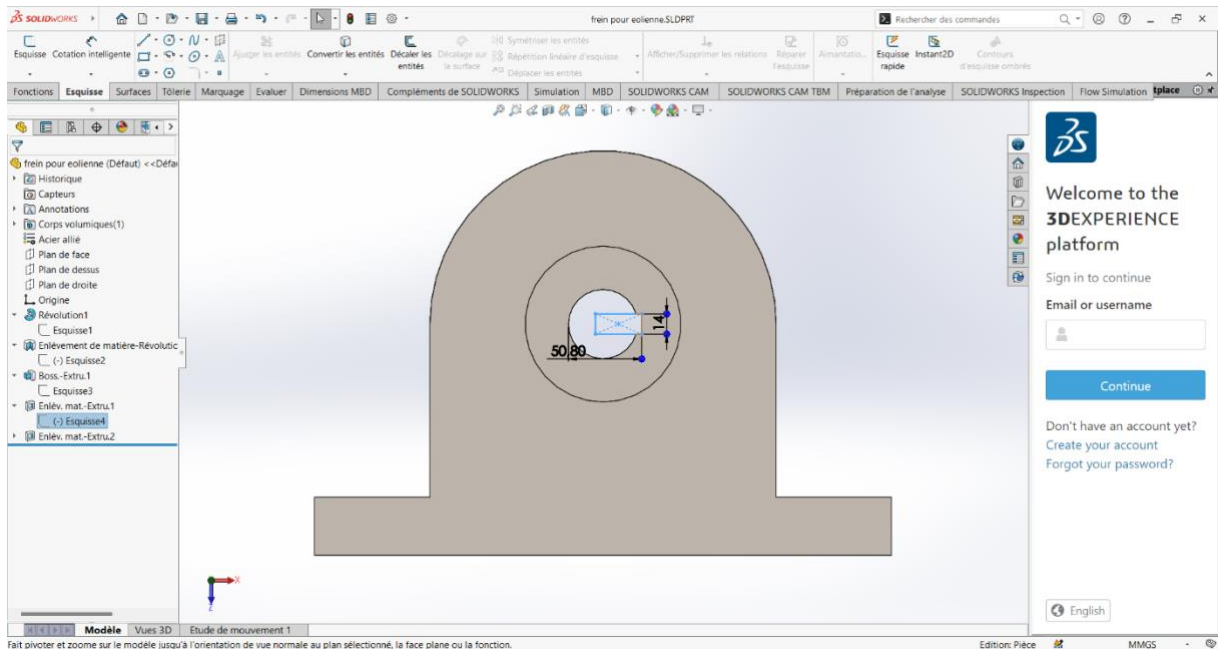


Figure III.27 Rainure de clavette

Réalisation des perçages de fixation

Enfin, des perçages oblongs sont ajoutés sur la structure externe pour la fixation du support à l'aide de vis ou de goujons. Chaque perçage mesure 21 mm de long pour 16 mm de large, et sont espacés de 30 mm en hauteur (voir Figure III.28).

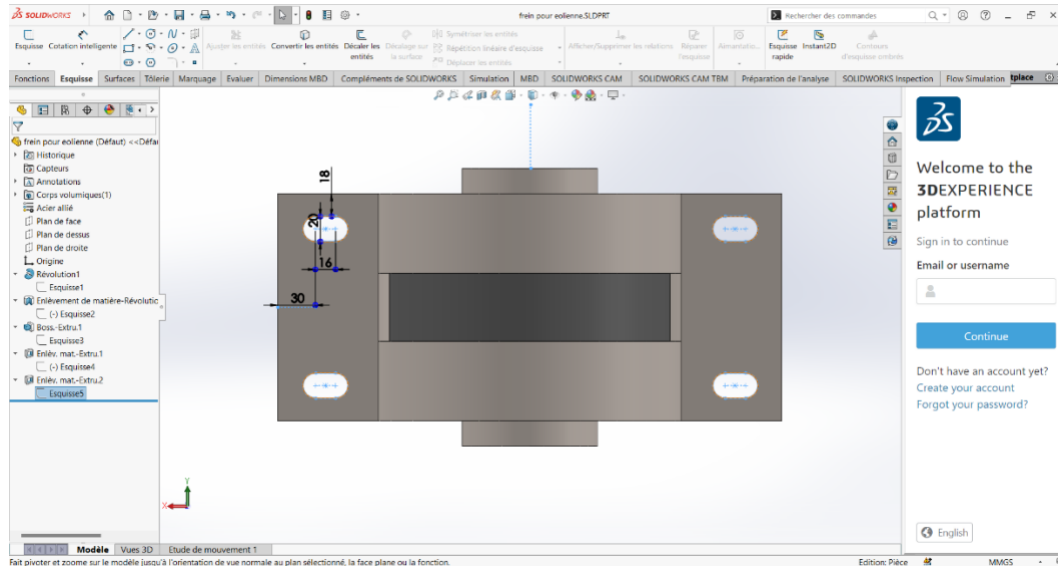


Figure III.28 Perçages oblongs pour la fixation de l'ensemble

2.7.Génératrice

Une génératrice synchrone à aimants permanents, de 5 kW à 1500 tr/min, a été intégrée et accouplée à l'arbre de sortie à l'aide d'un accouplement élastomère.

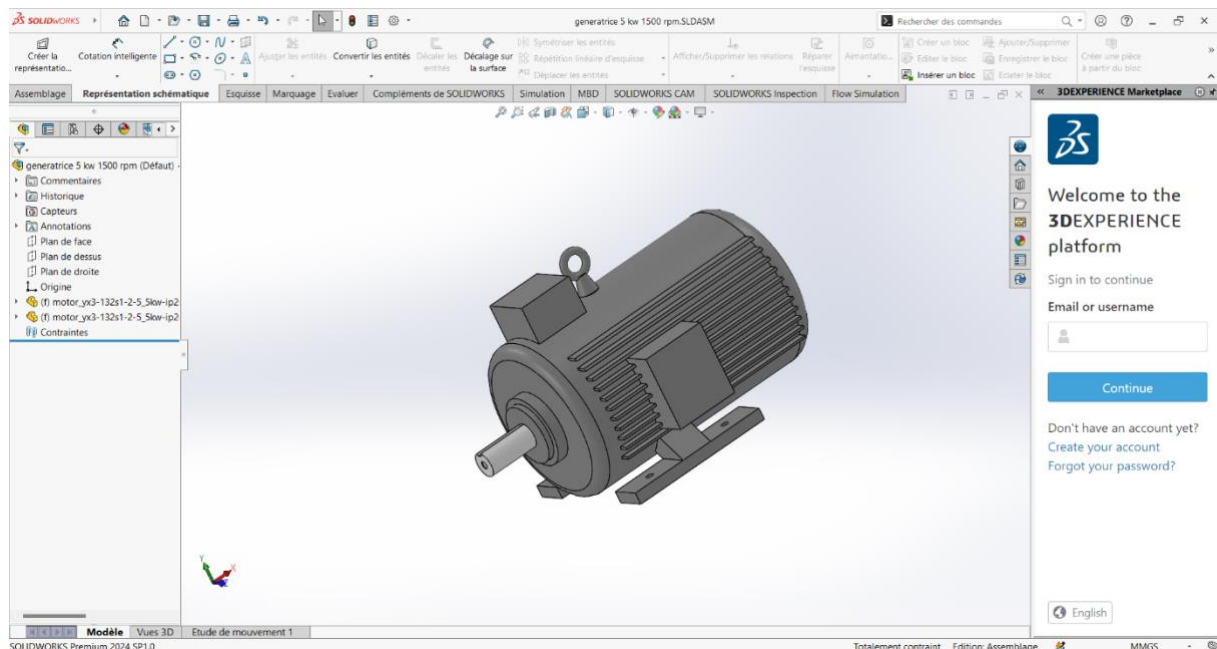


Figure III.29 Génératrice 5kW

## 2.8.Nacelle

La nacelle, conçue pour loger l'ensemble rotor-multiplicateur-génératrice, est réalisée en tôle d'acier AISI 1020. Elle est fixée sur le sommet du mât et orientable en fonction du vent.

### Modélisation de la nacelle

#### Esquisse de la forme générale

L'esquisse initiale définit le contour principal de la nacelle avec une longueur de 2000 mm et une largeur maximale de 750mm.

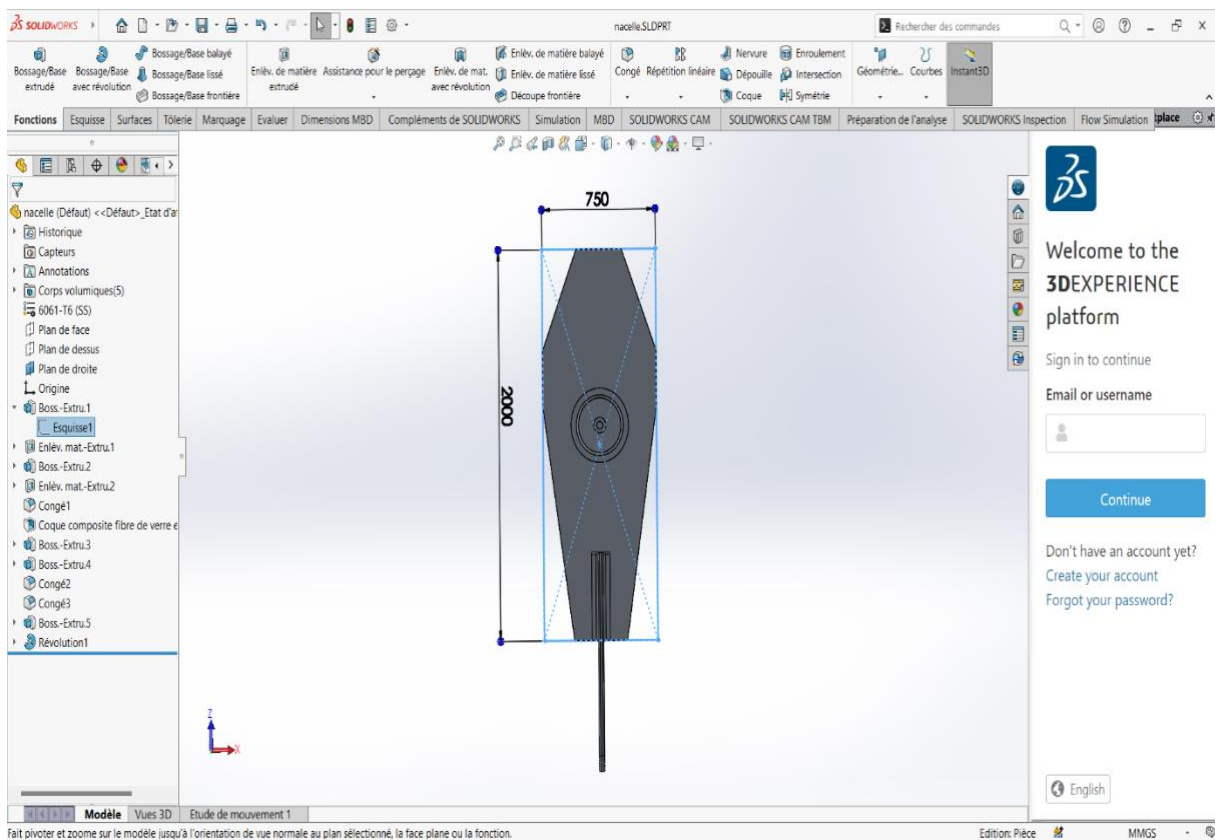


Figure III.30 Forme générale de la nacelle

#### Réduction du profil avant

Une deuxième esquisse permet d'affiner le profil avant en réduisant la largeur à 520 mm sur une longueur de 1200 mm, assurant un meilleur aérodynamisme.

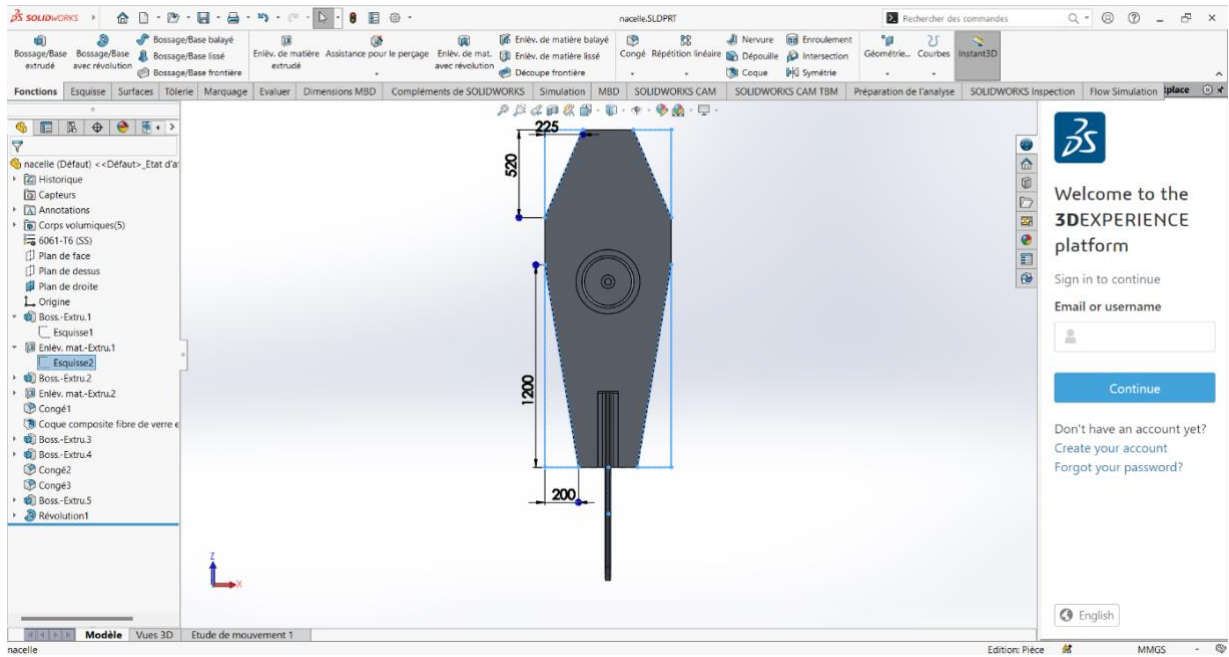


Figure III.31 Réduction de la section avant de la nacelle

**Création du volume principal**

La fonction "Bossage extrudé" est utilisée pour générer le volume de base de la nacelle à partir de l'esquisse précédente.

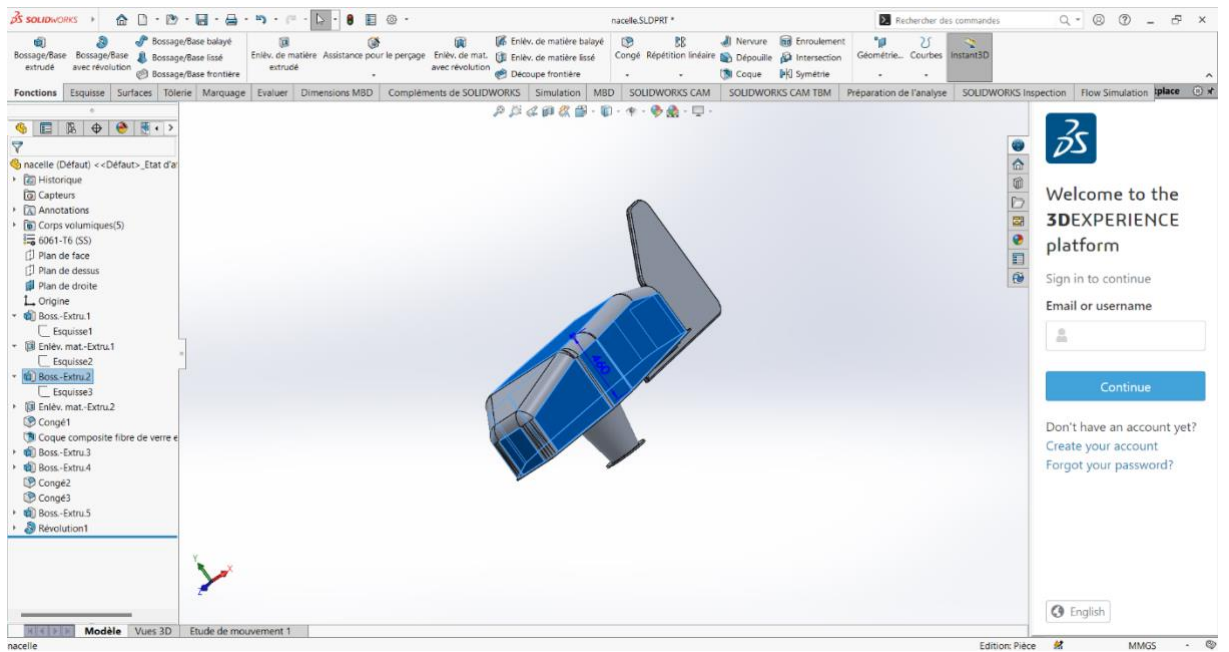


Figure III.32 Volume principal obtenu par extrusion

**Découpe supérieure du capot**

Une opération d'enlèvement de matière permet de créer un pan incliné sur le dessus de la nacelle pour affiner sa forme.

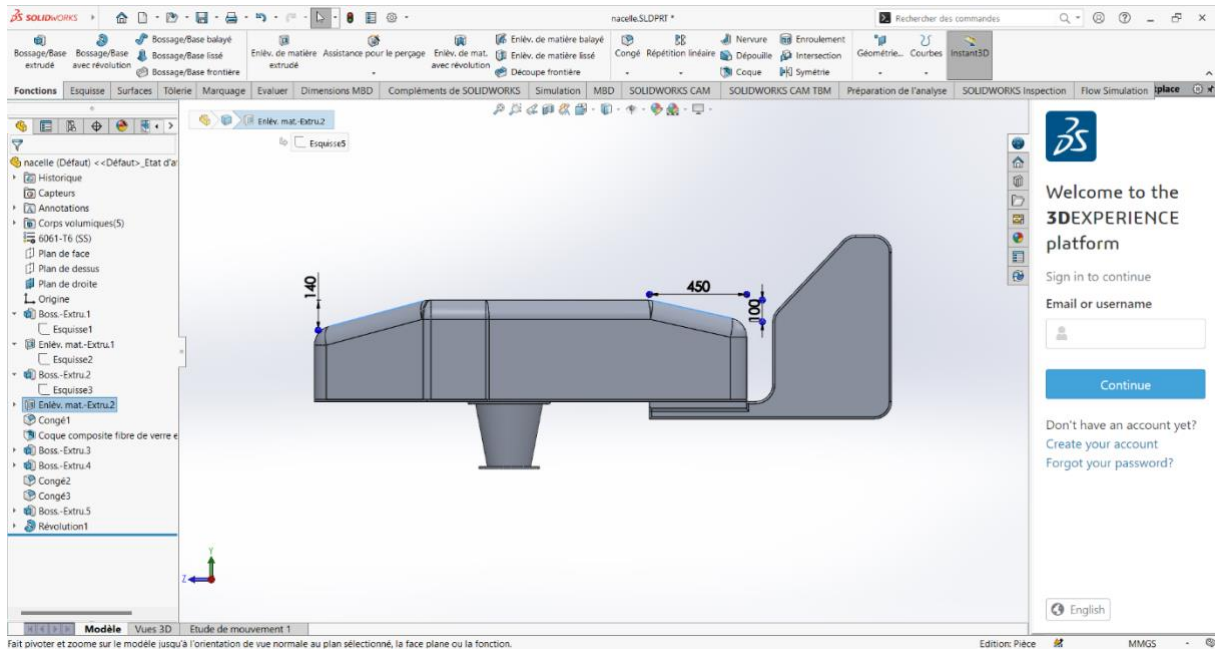


Figure III.33 Découpe supérieure inclinée

### Ajout de la dérive arrière

Une extrude supplémentaire est ajoutée pour modéliser la dérive verticale servant à stabiliser l'orientation de la nacelle face au vent.

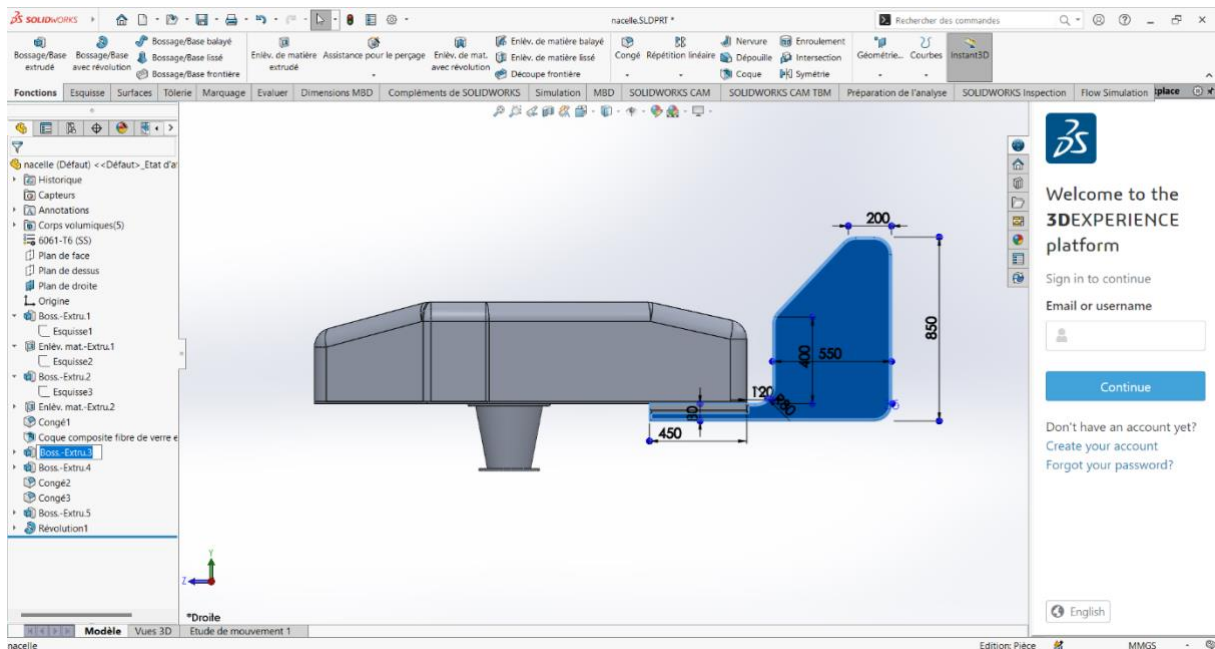


Figure III.34 Dérive verticale à l'arrière de la nacelle

Support pour assemblage avec le mât

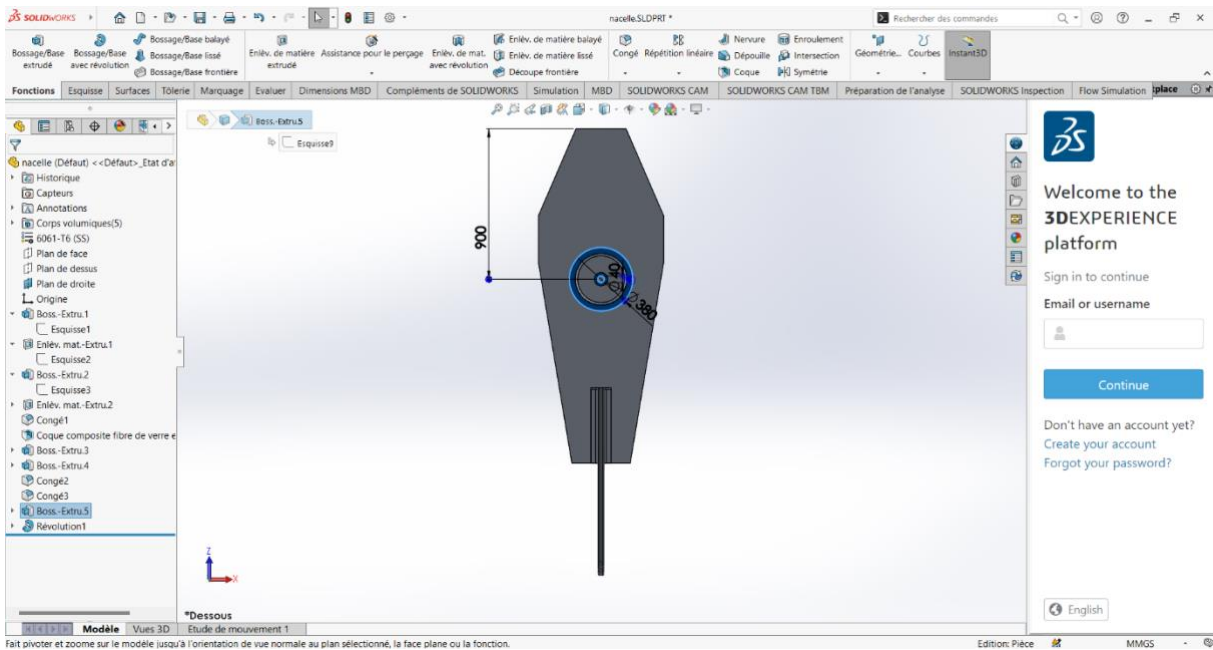


Figure III.35 Support mât

Réalisation du support circulaire

Enfin, un bossage avec révolution est utilisé pour créer le support d'interface circulaire en bas de la nacelle.

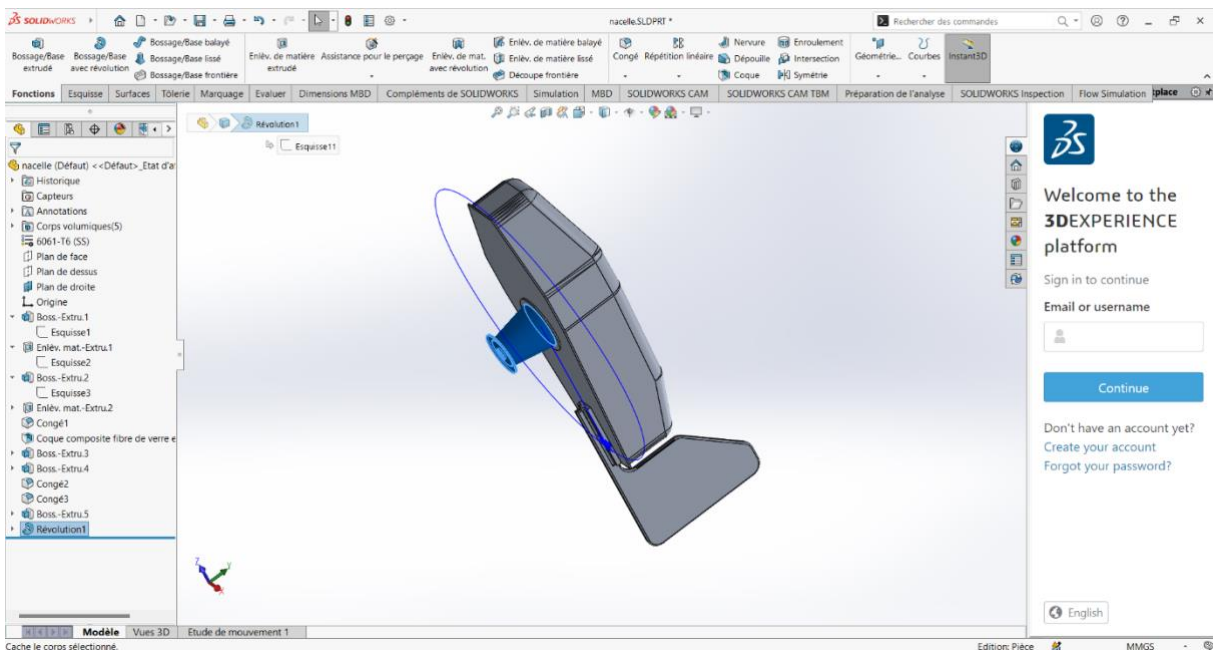


Figure III.36 Support circulaire obtenu par révolution

## 2.9.Mât

Le mât a une hauteur de 12 mètres, réalisé en acier S355N, dimensionné pour supporter les charges dynamiques tout en restant rigide. Il intègre des supports internes pour la fixation de la nacelle.

### Esquisse du profil du mât

Dans cette première étape, un profil conique a été esquissé sur un plan vertical, avec une hauteur totale de 12 000 mm, un diamètre de base de 400 mm et un diamètre supérieur de 200mm. Ce profil servira de base pour la fonction de révolution.

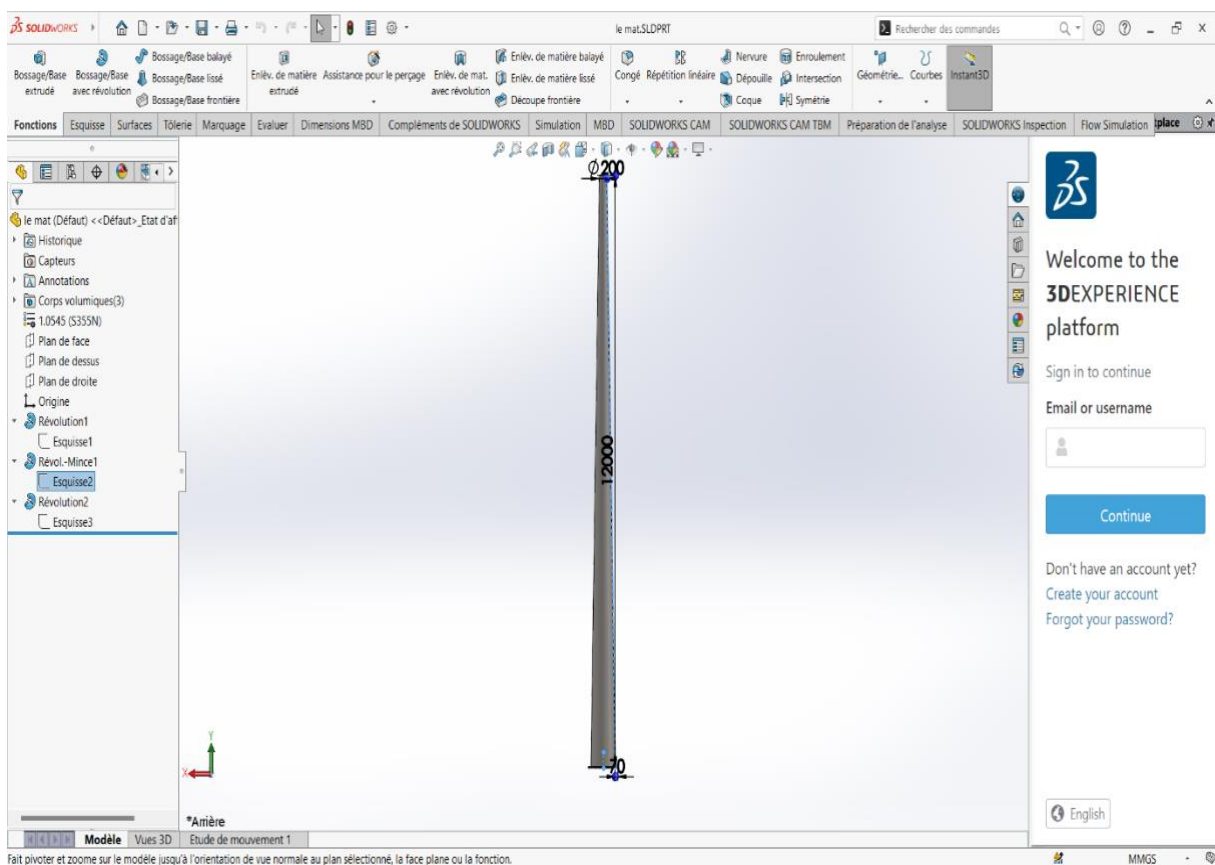


Figure III.37 Esquisse du profil du mât

### Révolution de la base du mât

La fonction de révolution a été utilisée pour générer le volume principal du mât autour de son axe longitudinal, à partir du profil défini précédemment.

**Création de la bride inférieure**

Une nouvelle esquisse a été réalisée à la base du mât afin d'ajouter une bride d'appui (Ø800mm) avec un évidement central (Ø400 mm) destiné à l'ancrage. Cette géométrie a été obtenue par une seconde fonction de révolution.

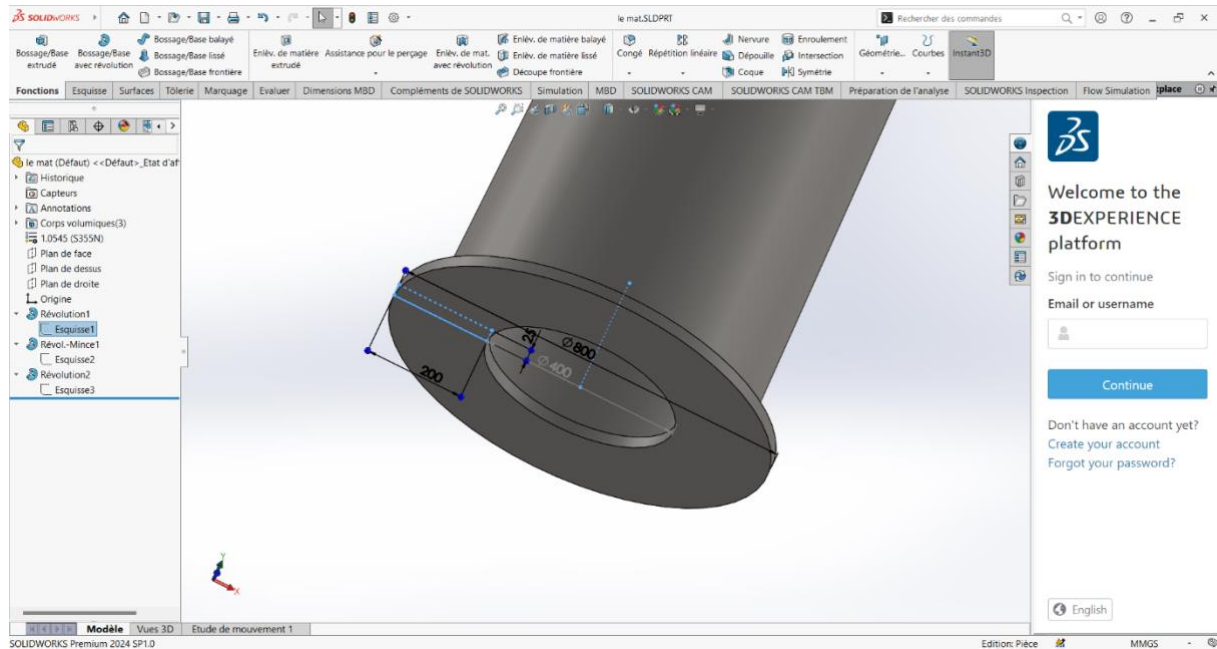


Figure III.38 La bride inférieure

**Esquisse de la platine supérieure**

Enfin, une dernière esquisse a permis de créer la platine supérieure avec un diamètre extérieur de 280 mm et un trou central de 140 mm. Cette géométrie est destinée à accueillir la nacelle.

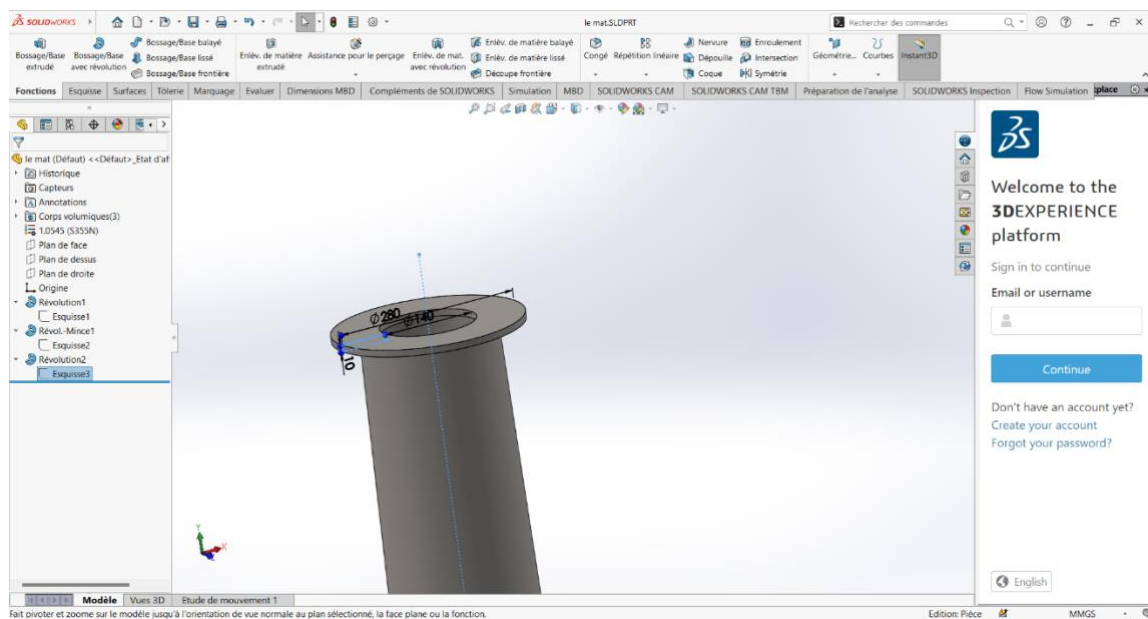


Figure III.39 La platine supérieure

### 3. Assemblage final de l'éolienne

L'assemblage global a été effectué en intégrant toutes les pièces dans un seul fichier d'assemblage SolidWorks. Les liaisons mécaniques ont été simulées (fixations, connexions coaxiales, rotules, etc.). Le modèle a été vérifié pour l'absence d'interférences et pour l'ajustement correct des jeux.

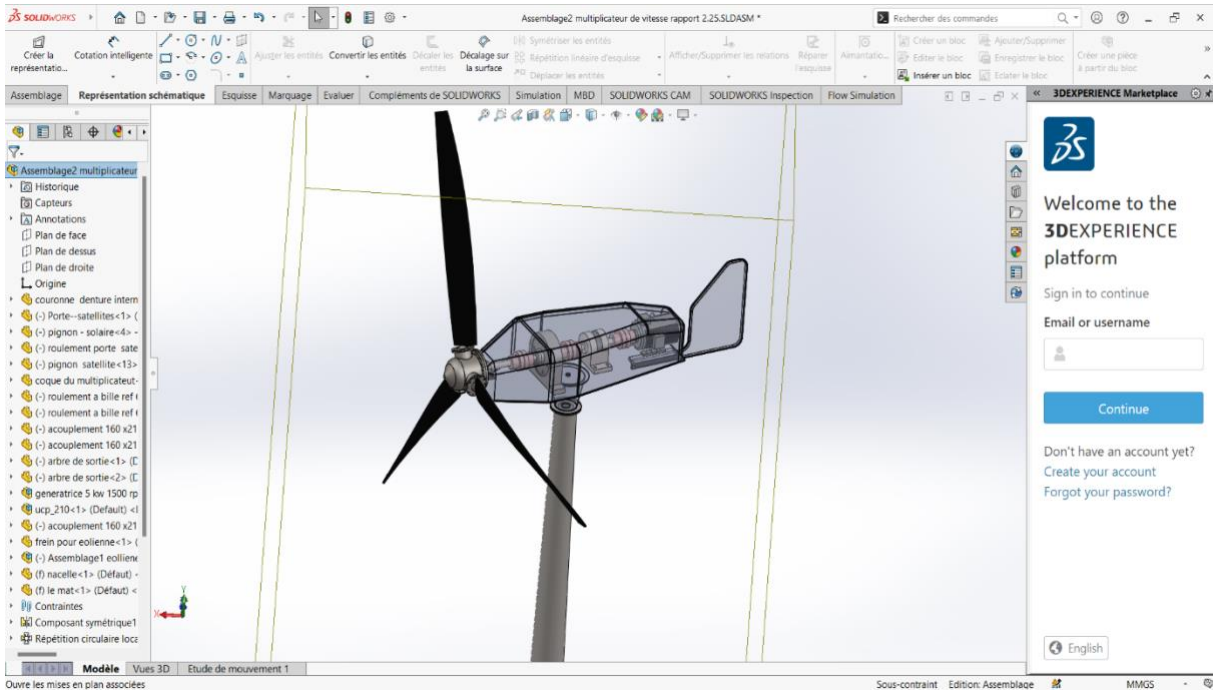


Figure III.40 Assemblage de l'éolienne

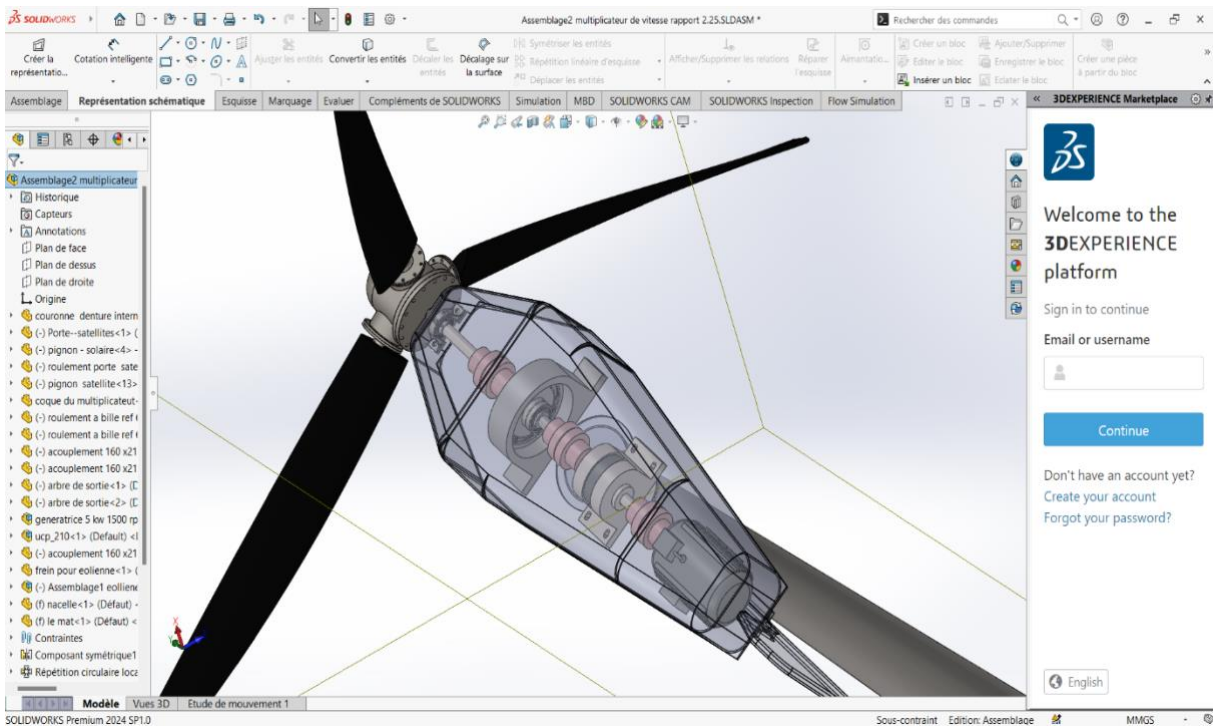


Figure III.41 Zoom sur la partie mécanique de l'éolienne

#### 4. Mise en plan 2D des composants

Des mises en plan normalisées ont été générées pour chaque composant essentiel : arbre d'entrée, arbre de sortie, rotor, multiplicateur, mât, etc., comprenant les côtes fonctionnelles, les tolérances et les matériaux.

Pour accompagner la mise en plan de toutes tes pièces, tu peux rédiger une **introduction technique claire** qui présente l'objectif de l'ensemble, suivie d'une **description brève et normalisée pour chaque pièce**. Voici un exemple de texte que tu peux utiliser et adapter dans ton rapport ou ton mémoire :

#### 5. Mise en plan des composants mécaniques de l'éolienne domestique

Dans le cadre de la conception d'une éolienne domestique d'une puissance de 5 kW, chaque composant mécanique a été modélisé en 3D à l'aide du logiciel **SolidWorks 2024**, puis mis en plan selon les normes de dessin technique. Les différentes vues (de face, de dessus, de côté, isométrique) permettent une lecture complète de chaque pièce, avec cotations fonctionnelles et dimensionnelles précises.

Liste des pièces mises en plan :

1. Arbre d'entrée

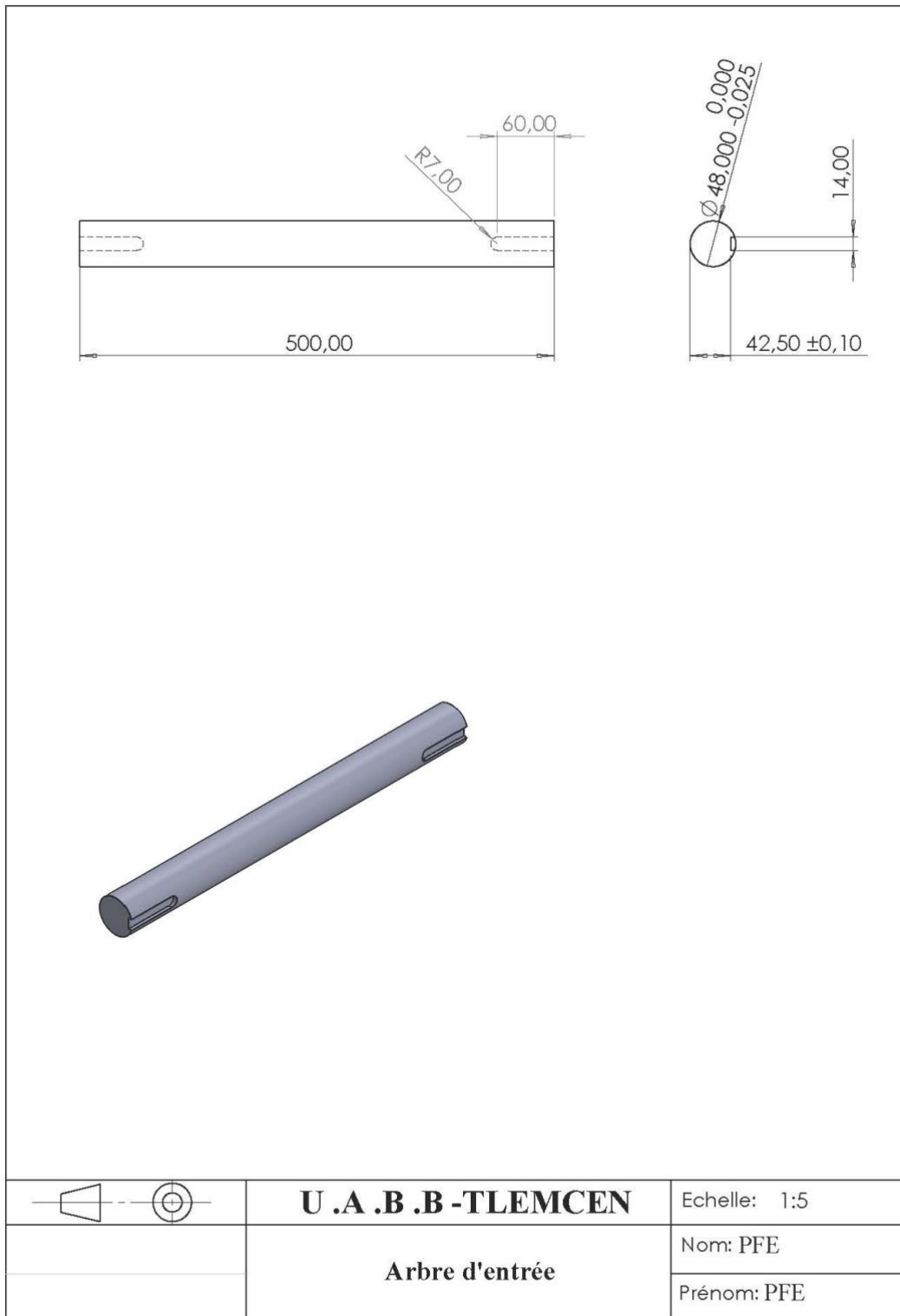


Figure III.42 Mise en plan arbre d'entrée

2. Pignon solaire

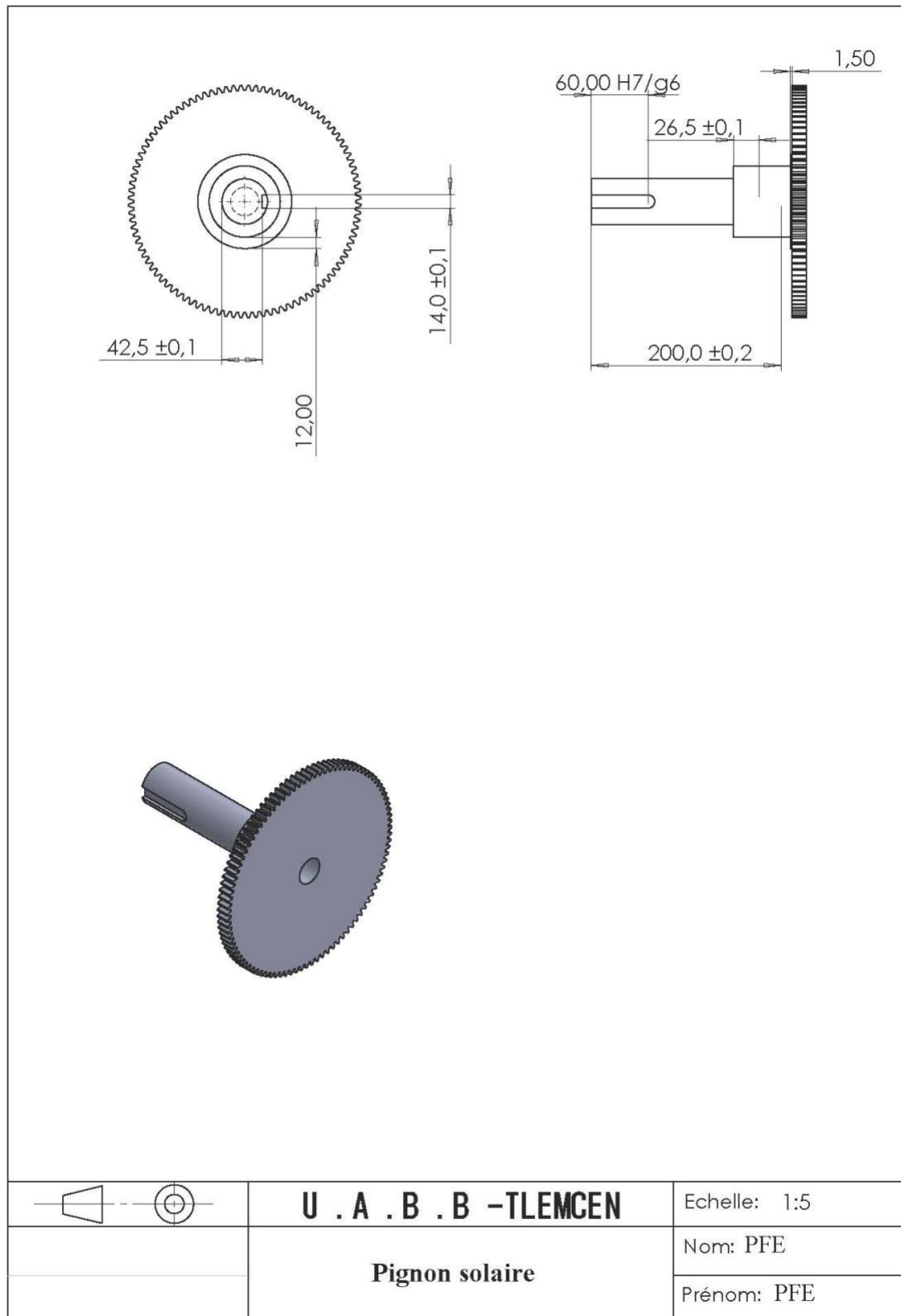


Figure III.43 Mise en plan pignon solaire

3. Pignon satellite

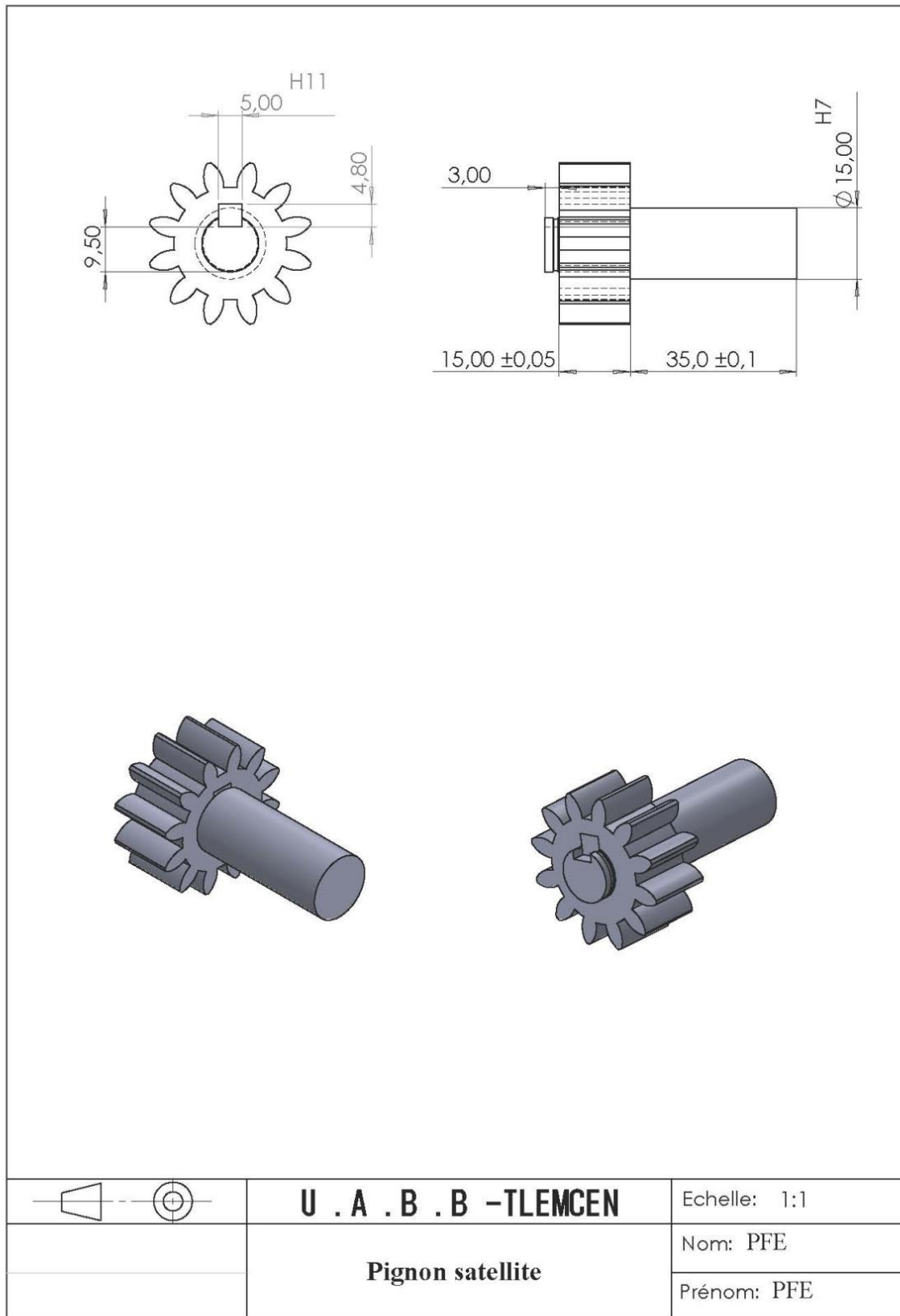


Figure III.44 Mise en plan pignon satellite

4. Couronne à denture interne

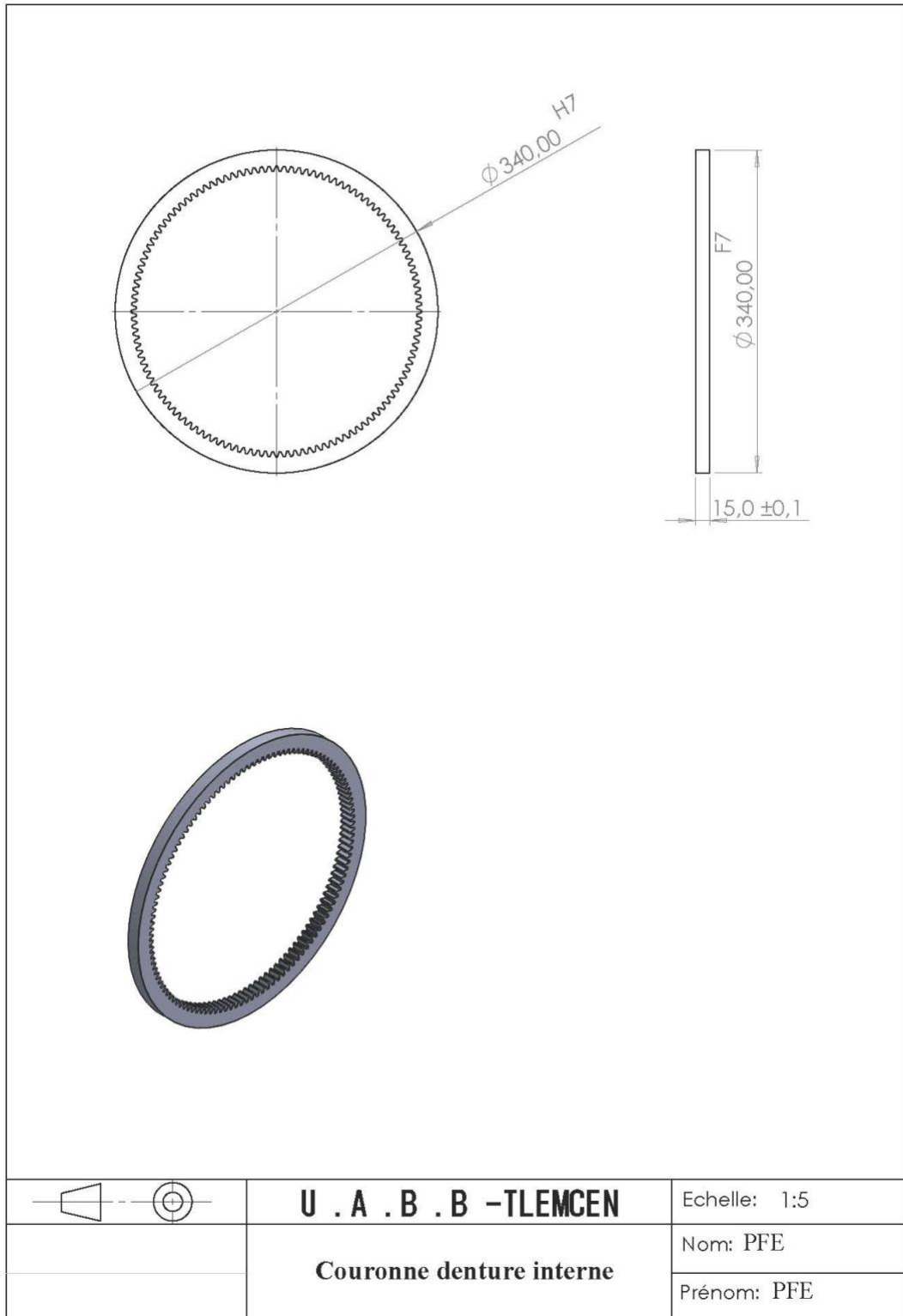


Figure III.45 Mise en plan couronne à denture interne

5. Porte-satellites

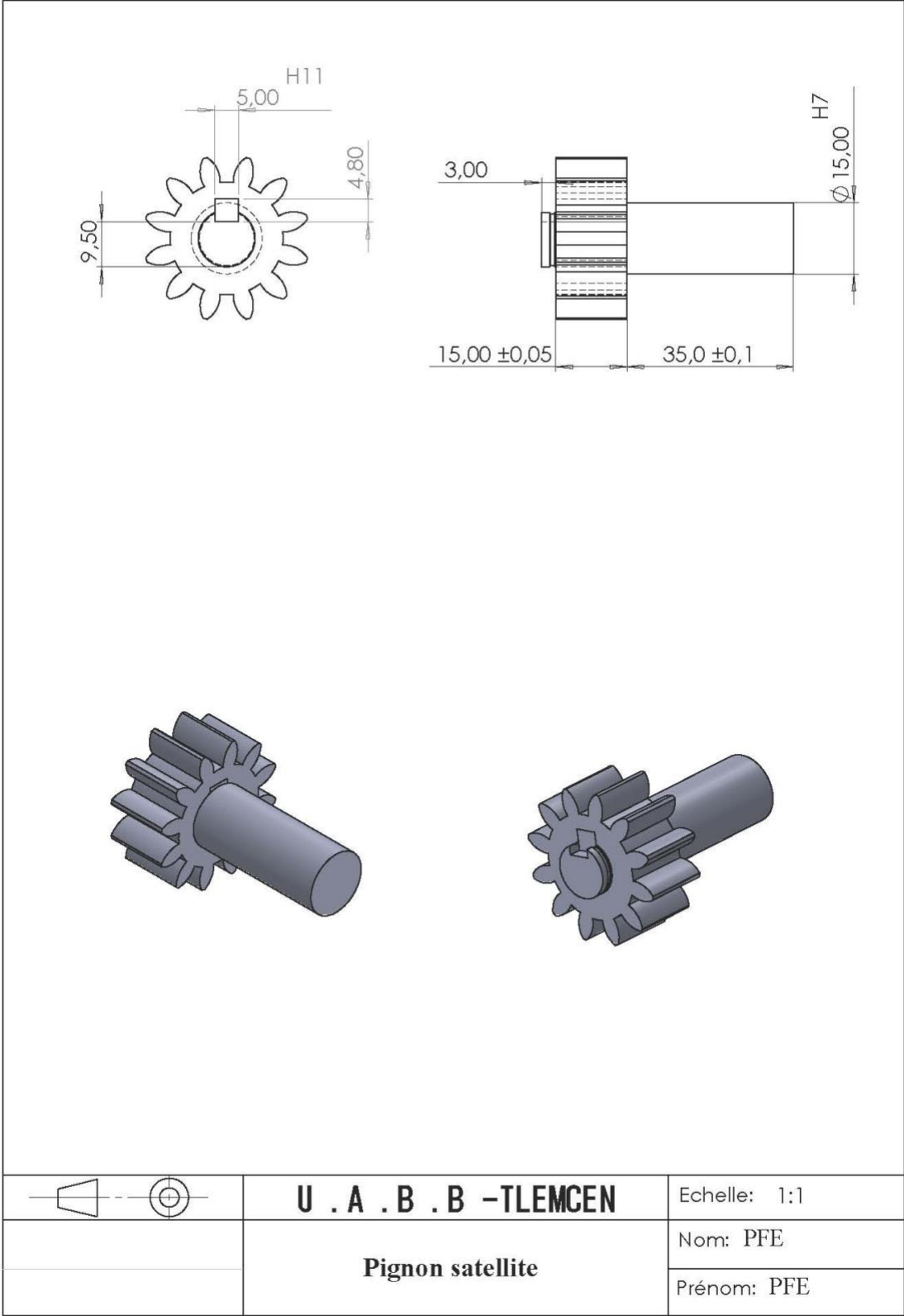


Figure III.46 Mise en Plan Porte-satellites

6. Moyeu

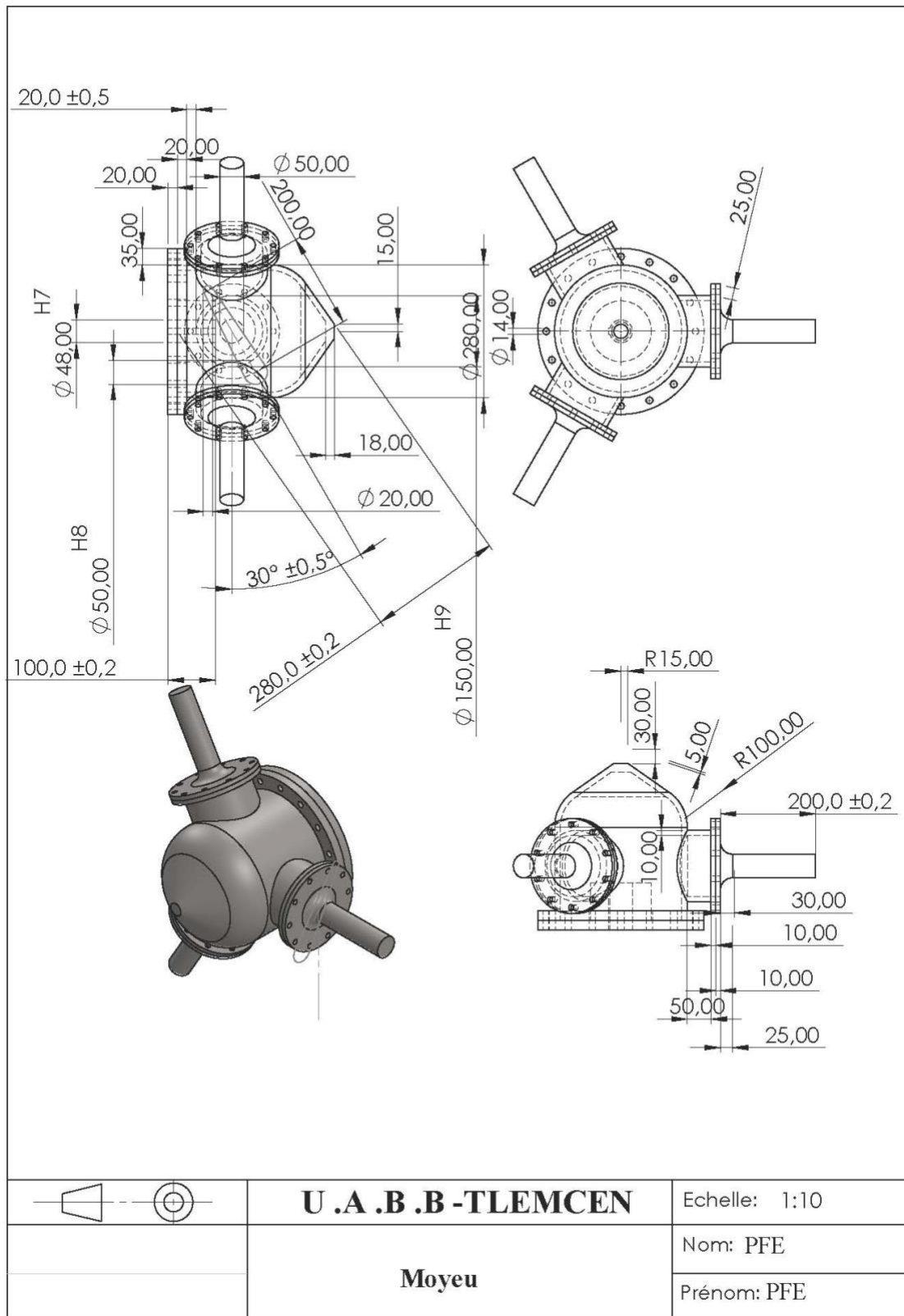


Figure III.47 Mise en plan Moyeu

7. Pale

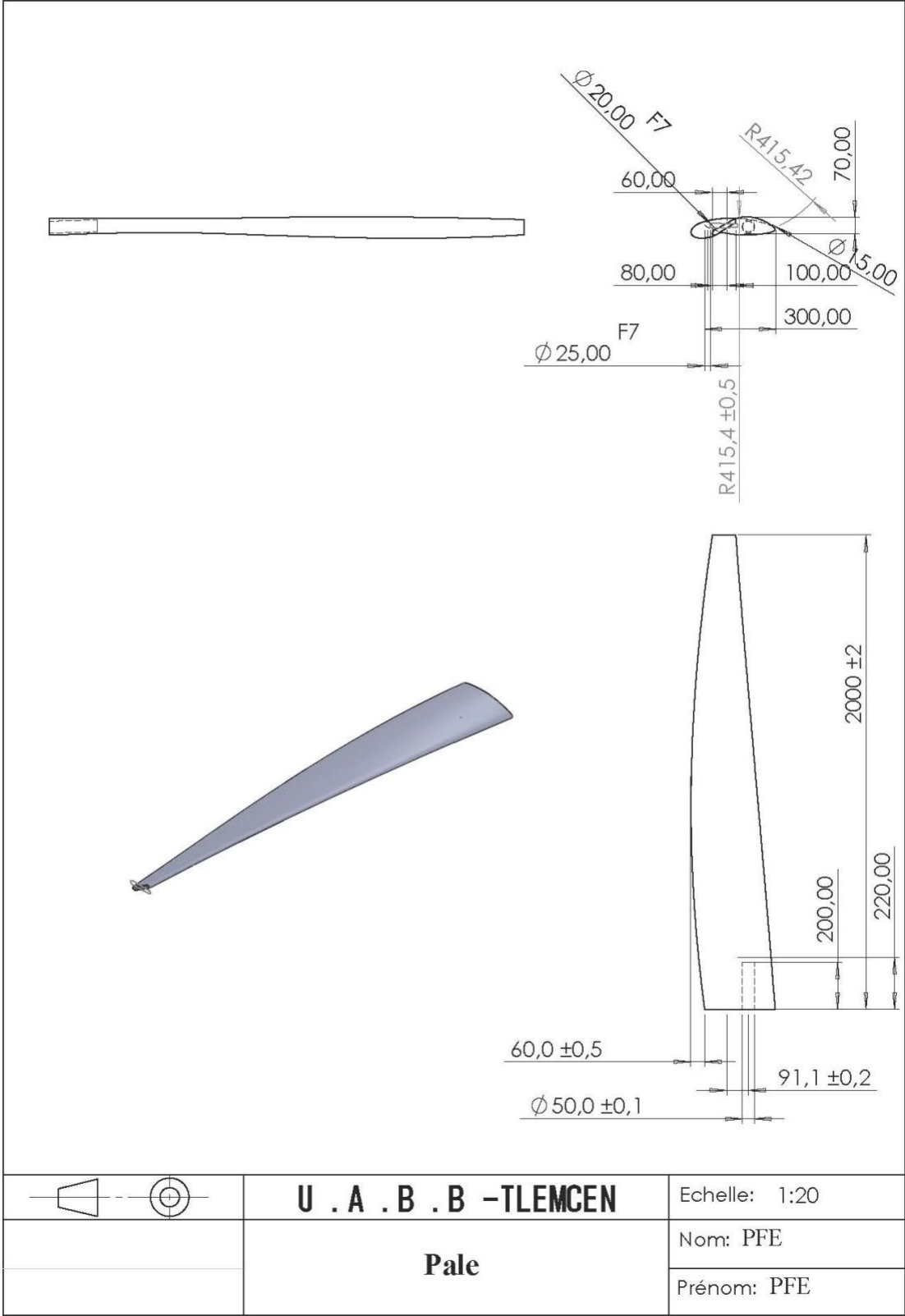


Figure III.48 Mise en plan pale

8. Frein à disque

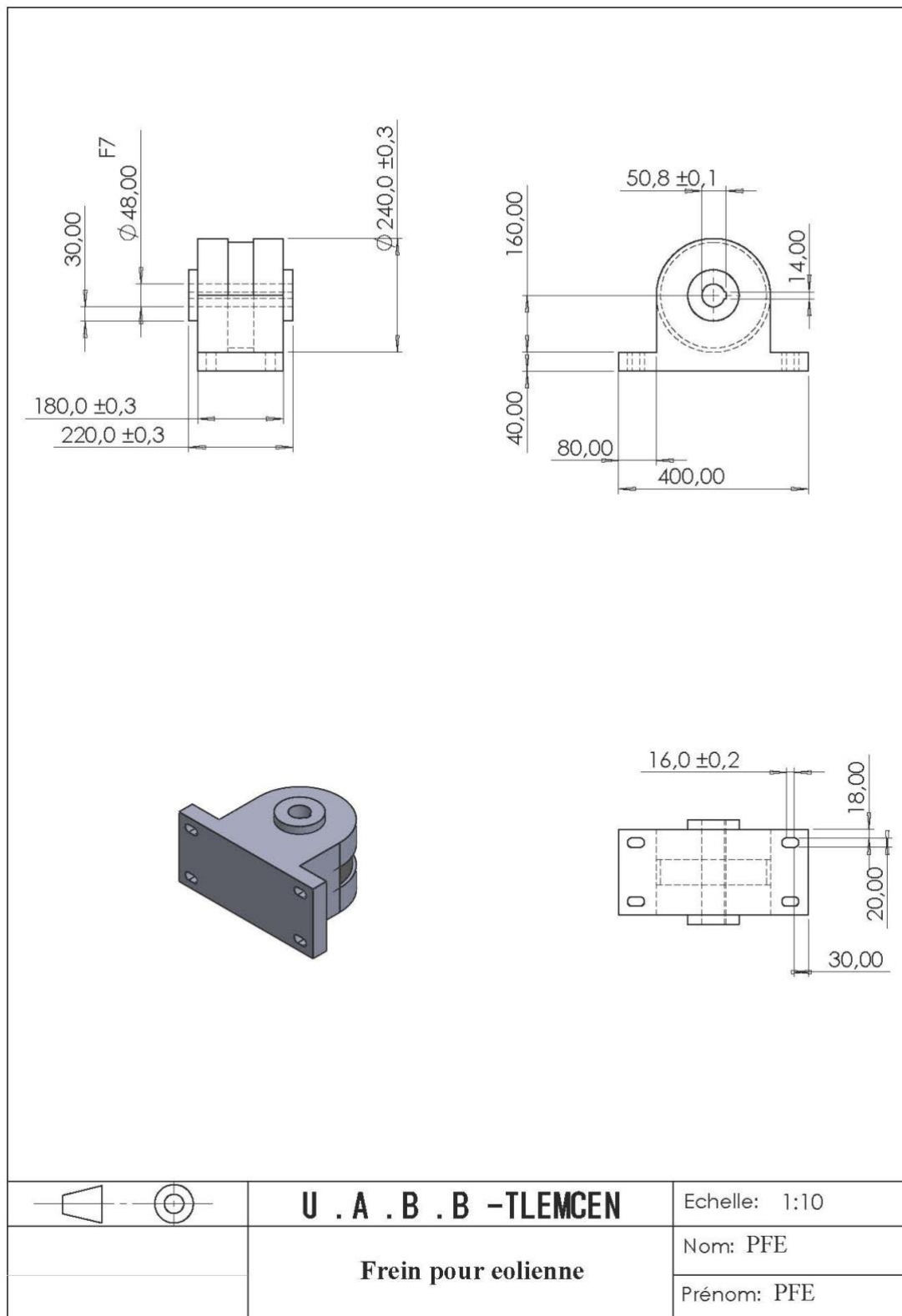


Figure III.49 Mise en plan freins

9. Nacelle

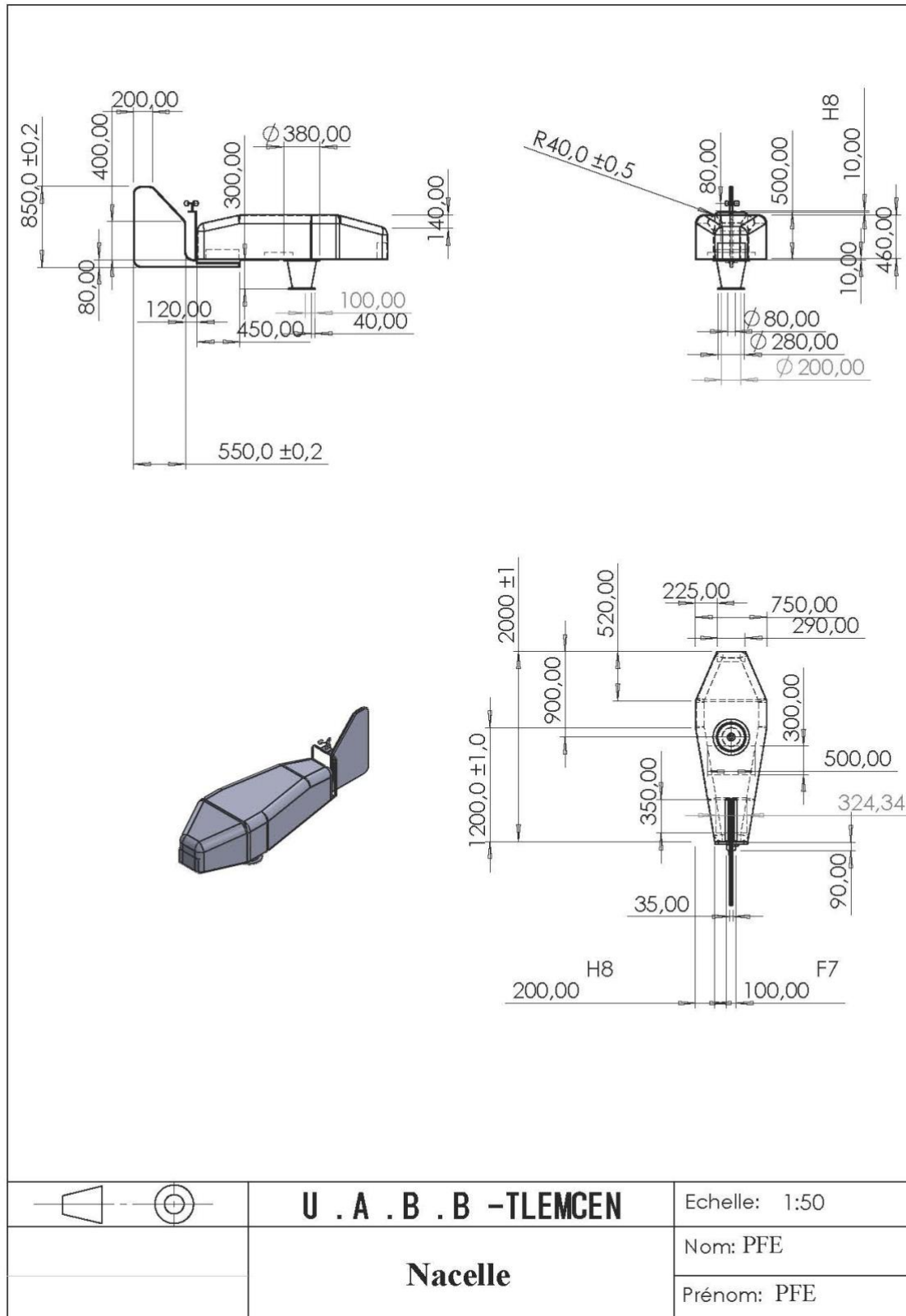


Figure III.50 Mise en plan de la nacelle

10. Mât

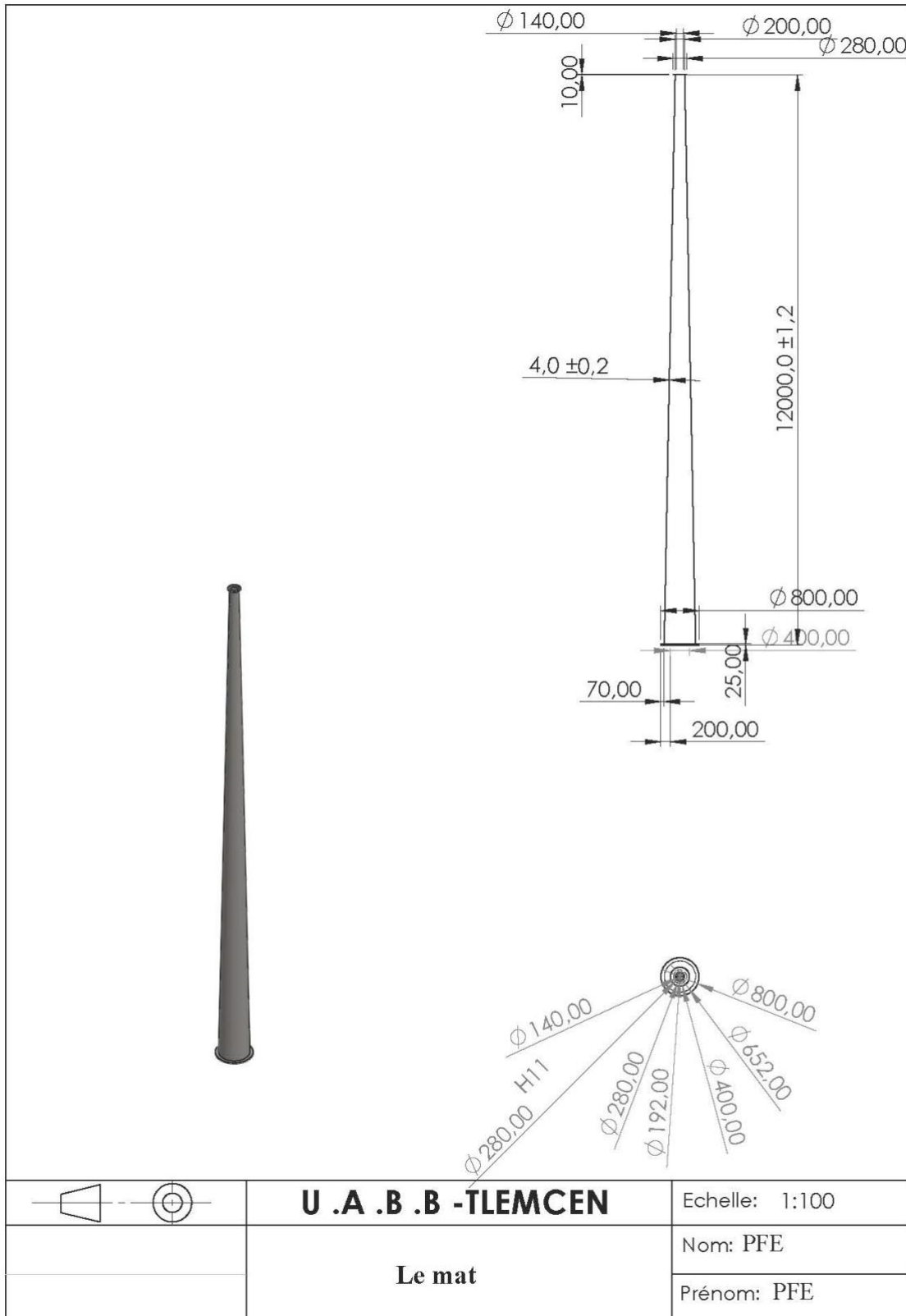


Figure III.51 Mise en plan mat

- **Conclusion**

La modélisation 3D complète de l'éolienne a permis de valider l'ensemble des choix de conception réalisés au cours du projet. Le recours à SolidWorks a facilité l'optimisation géométrique, l'intégration mécanique et la vérification des contraintes d'encombrement. Ce travail de CAO représente une étape essentielle avant toute fabrication ou phase de prototypage.

**Chapitre IV :**  
**Étude de simulation de l'éolienne**  
**sous l'effet du vent**

## 1. Introduction

Dans ce chapitre, une analyse par éléments finis est réalisée sur une pale de l'éolienne afin d'évaluer son comportement mécanique sous l'effet du vent. La simulation est effectuée à l'aide de **SolidWorks Simulation**, en modélisant les **contraintes de von Mises**, les **déformations**, les **déplacements** ainsi que le **coefficient de sécurité**. Le matériau utilisé est un composite à matrice polymère renforcée de fibres de carbone : **Hexcel AS4C (3000 filaments)**.

## 2. Préparation du modèle

La pale utilisée pour la simulation est celle conçue avec un profil aérodynamique **NACA 4412**, d'une longueur de **2 mètres**.

### Matériau affecté à la pale

Le matériau affecté est **Hexcel AS4C**, dont les propriétés mécaniques utilisées sont :

- **Module d'élasticité** : 134 GPa
- **Masse volumique** : 1790 kg/m<sup>3</sup>
- **Limite d'élasticité (traction)** : 2310 MPa
- **Conductivité thermique** : 6.3 W/m·K
- **Chaleur spécifique** : 810 J/kg·K

## 3. Mise en place de la simulation

### 3.1. Étude de type statique

L'étude effectuée est de type **statique linéaire**, en supposant une charge constante du vent sur la surface de la pale.

#### Conditions aux limites

- **Encastrement** : La base de la pale est entièrement fixée (condition "Fixe-1").
- **Chargement** : Une **pression uniforme de 245 N/m<sup>2</sup>** est appliquée sur la surface exposée au vent.

### 3.2. Maillage

Un maillage avec des **éléments tétraédriques** a été généré automatiquement, en adaptant la taille pour obtenir une bonne qualité.

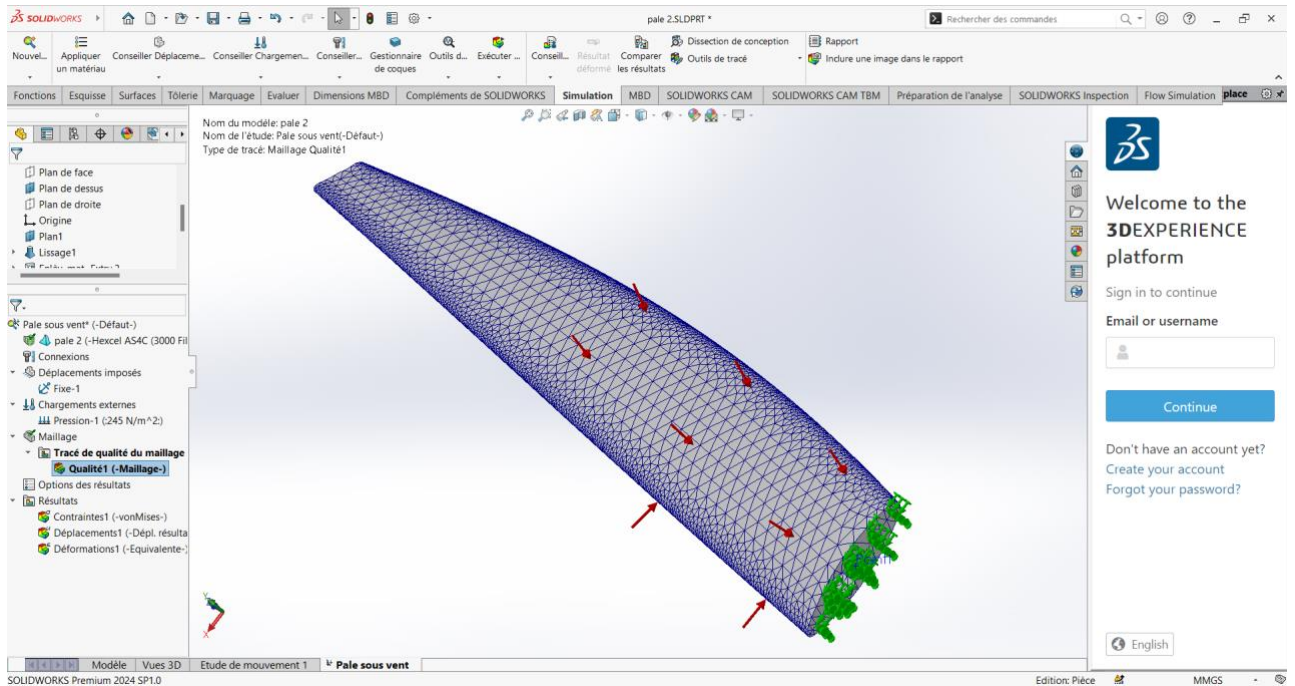


Figure IV.1 Maillage de la pale

### 3.3. Résultats de la simulation

- **Contrainte de Von Mises**

Les contraintes maximales obtenues sont très faibles comparées à la limite d'élasticité du matériau. Cela signifie que la pale est **largement résistante** face aux sollicitations du vent.

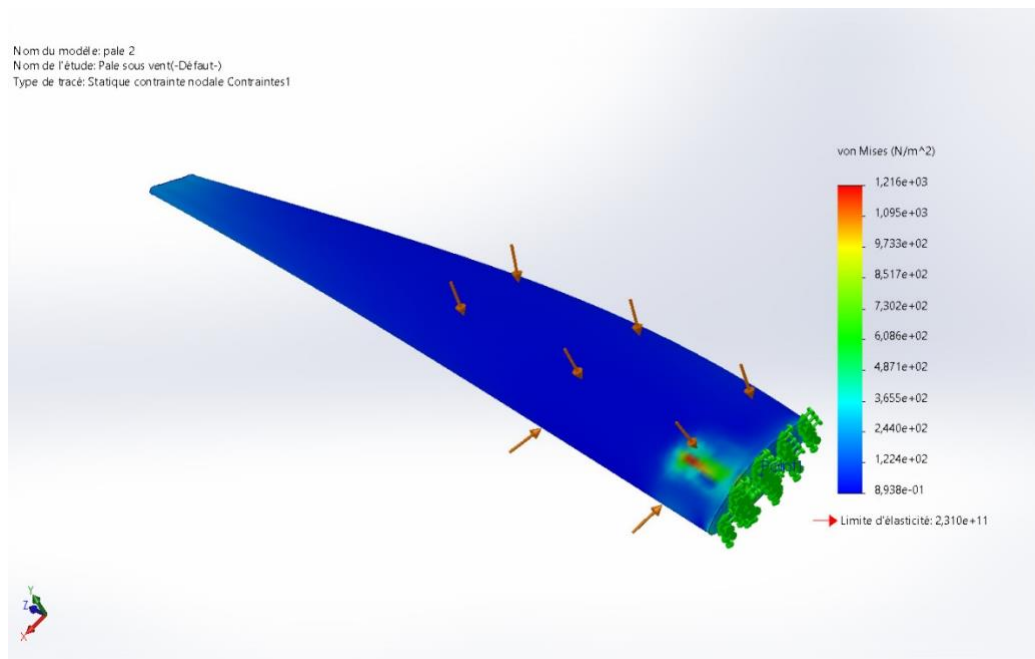
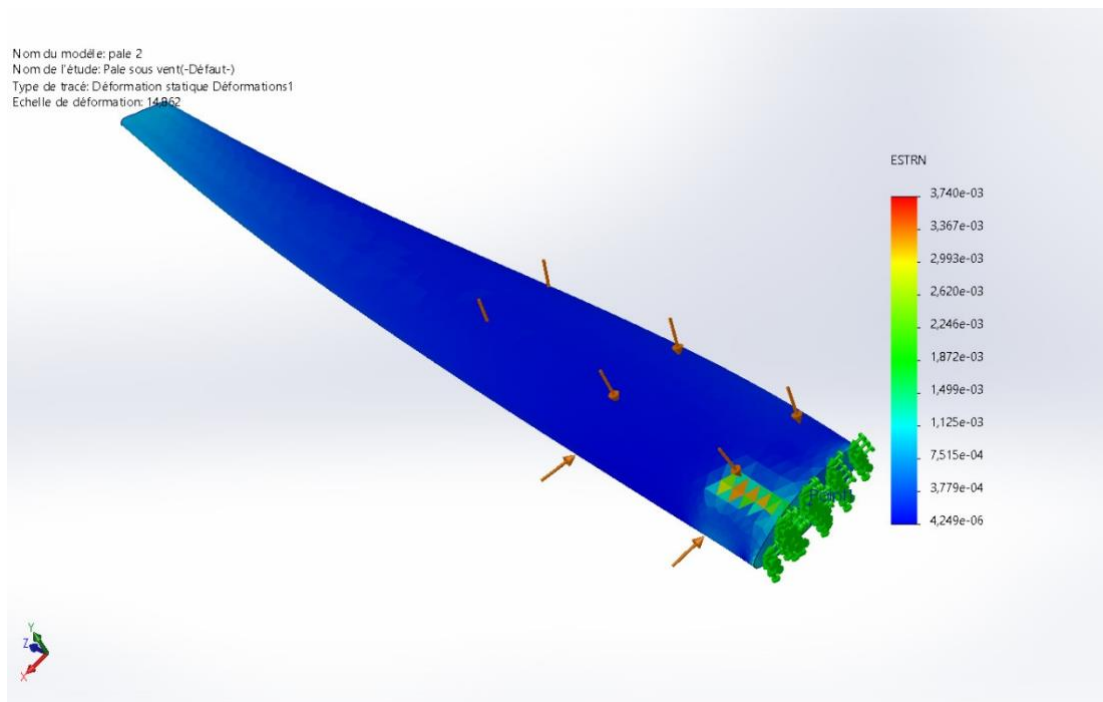


Figure IV.2 Résultats des Contraintes de Von Mises

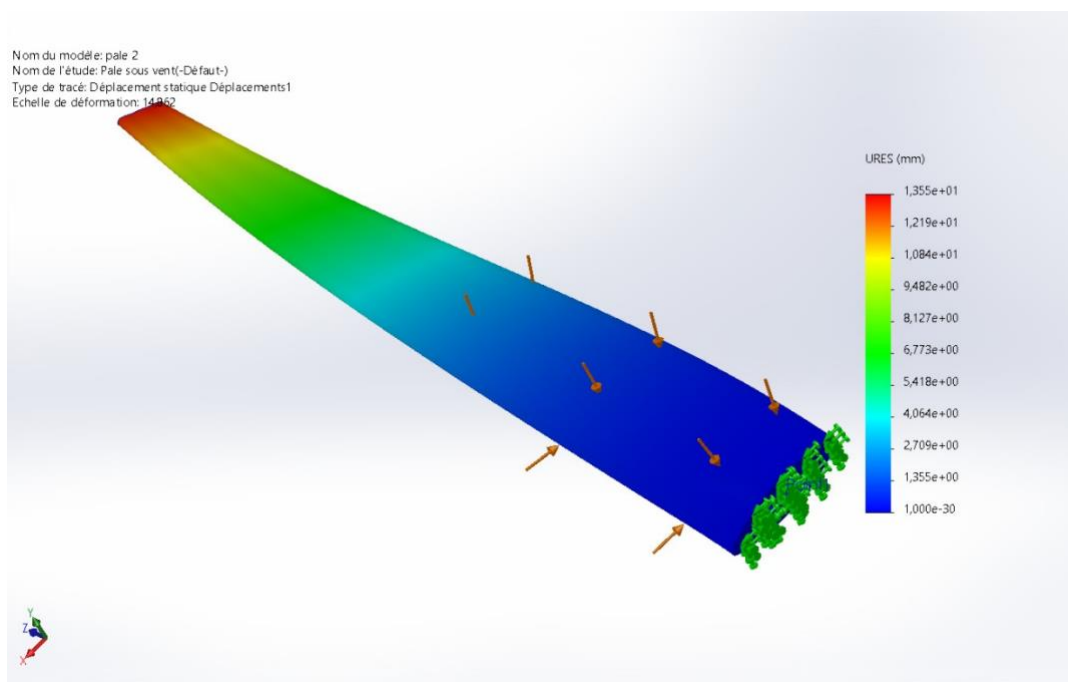
- **Déformation**

La déformation est **localisée** principalement à l'extrémité libre de la pale. Les résultats indiquent une bonne **rigidité**.



- **Déplacement**

Le déplacement maximal est d'environ **13.55 mm**, situé à l'extrémité. Ce résultat est conforme à un comportement flexible contrôlé.



### 3.4. Discussion des résultats

Les résultats obtenus démontrent que la pale conçue peut résister aux sollicitations aérodynamiques à une vitesse de vent de 20 m/s. La faible contrainte de Von Mises et les faibles déplacements montrent une **bonne tenue mécanique**. Le coefficient de sécurité élevé confirme que la **pale ne risque pas de rupture** dans les conditions de service simulées.

### 3.5. Conclusion

Cette simulation confirme la pertinence du matériau choisi (Hexcel AS4C) pour les pales d'éolienne et valide le modèle mécanique dans un premier temps. Une étude dynamique pourrait compléter cette analyse pour des régimes transitoires ou en cas de rafales.

## 4. Simulation du comportement cinématique du multiplicateur de vitesse planétaire

### 4.1. Introduction

Dans le but de valider le bon fonctionnement mécanique du multiplicateur de vitesse planétaire conçu pour l'éolienne domestique de 5 kW, une simulation de type *Analyse de mouvement* a été réalisée sous SolidWorks. Cette simulation permet de visualiser le transfert de mouvement et de calculer la vitesse de rotation de l'arbre de sortie à partir d'une vitesse d'entrée imposée.

### 4.2. Objectifs de la simulation

- Vérifier la transmission de vitesse à travers l'engrenage planétaire.
- Déterminer la vitesse de sortie générée à partir d'une entrée connue.
- S'assurer de la cohérence du rapport de transmission (2,25).

### 4.3. Préparation de l'assemblage

- Assemblage complet du multiplicateur : pignon solaire, satellites, couronne interne, porte-satellites, arbres d'entrée et de sortie, roulements et carter.
- Application de contraintes de contact entre les engrenages.
- Définition des liaisons (concentricité, fixations).

### Configuration du moteur d'entrée

- Vitesse imposée à l'arbre d'entrée : 668 tr/min (soit environ 70 rad/s).
- Moteur de type « Vitesse constante » appliqué sur une face de l'arbre d'entrée.

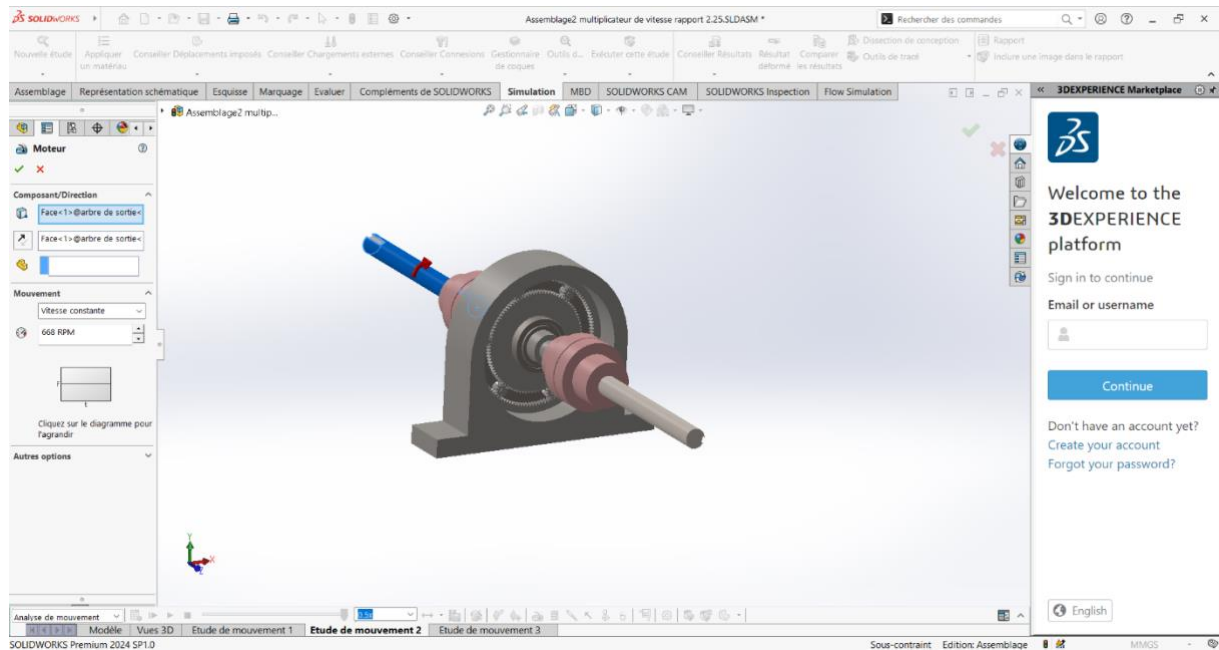


Figure IV.5 Vitesse de l'arbre d'entrée fixé

### Mise en place des capteurs

- Un capteur de vitesse angulaire a été appliqué sur l'arbre de sortie afin de mesurer la rotation issue de la transmission.
- Le graphique obtenu montre une vitesse angulaire de 9018 deg/s, soit environ 1500 tr/min.

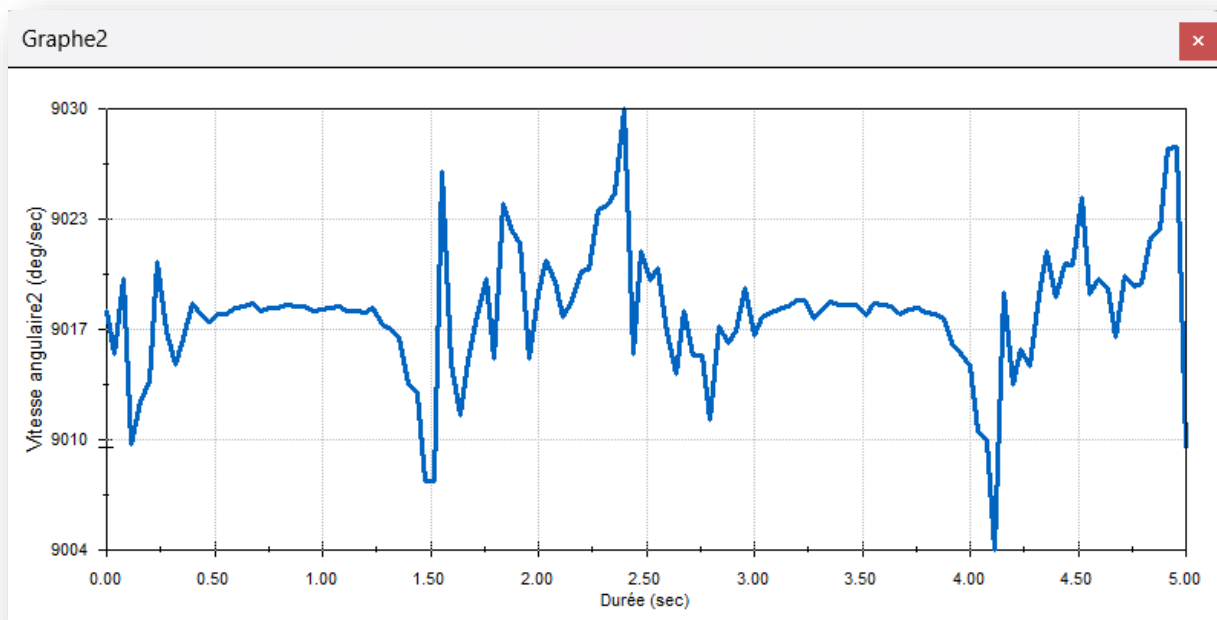


Figure IV.6 Résultats de vitesse de l'arbre de sortie

#### 4.4. Analyse des résultats

- Le rapport entre les vitesses est conforme au rapport de transmission de 2,25 attendu.
- Le système montre un bon comportement dynamique avec une vitesse de sortie stable.

#### 4.5. Conclusion

Cette simulation a permis de confirmer le bon fonctionnement mécanique du multiplicateur planétaire modélisé. Le rapport de vitesse mesuré valide les choix de conception, garantissant l'atteinte de la vitesse requise pour entraîner la génératrice.

## 5. Analyse aérodynamique des pales par simulation d'écoulement avec SolidWorks Flow Simulation

Dans cette section, nous présentons une simulation aérodynamique complète des pales de l'éolienne, réalisée à l'aide de SolidWorks Flow Simulation. Cette simulation vise à visualiser l'interaction du vent avec les pales, à analyser la distribution de la pression et de la vitesse autour des surfaces, ainsi qu'à extraire des résultats utiles tels que les forces, le couple et la vitesse de l'air.

### 5.1. Préparation de la simulation

La simulation est configurée à partir de l'assemblage complet de l'éolienne avec ses trois pales. Les principales étapes sont :

- **Création du domaine de calcul** autour de l'éolienne.
- **Définition de la vitesse du vent** : un flux d'air de 20 m/s est appliqué en entrée du domaine, conformément aux conditions de fonctionnement fixées dans les chapitres précédents.
- **Définition des objectifs de simulation** : la pression, la vitesse, la force et le moment de torsion sont les grandeurs physiques que nous souhaitons analyser.

### 5.2. Maillage

Un maillage global a été appliqué au volume fluide contenant l'éolienne. Ce maillage est crucial pour la précision des résultats :

- **Type de maillage** : cartésien, automatique.
- **Raffinement local** appliqué autour des pales pour capter les gradients de pression et de vitesse.

5.3.Résultats obtenus et interprétation

Les résultats sont affichés sous plusieurs formes graphiques et visuelles :

- **Champ de vitesses** (Figure 77) : visualisation du profil de vitesse sur un plan de coupe. On observe une accélération de l'air au passage entre les pales.

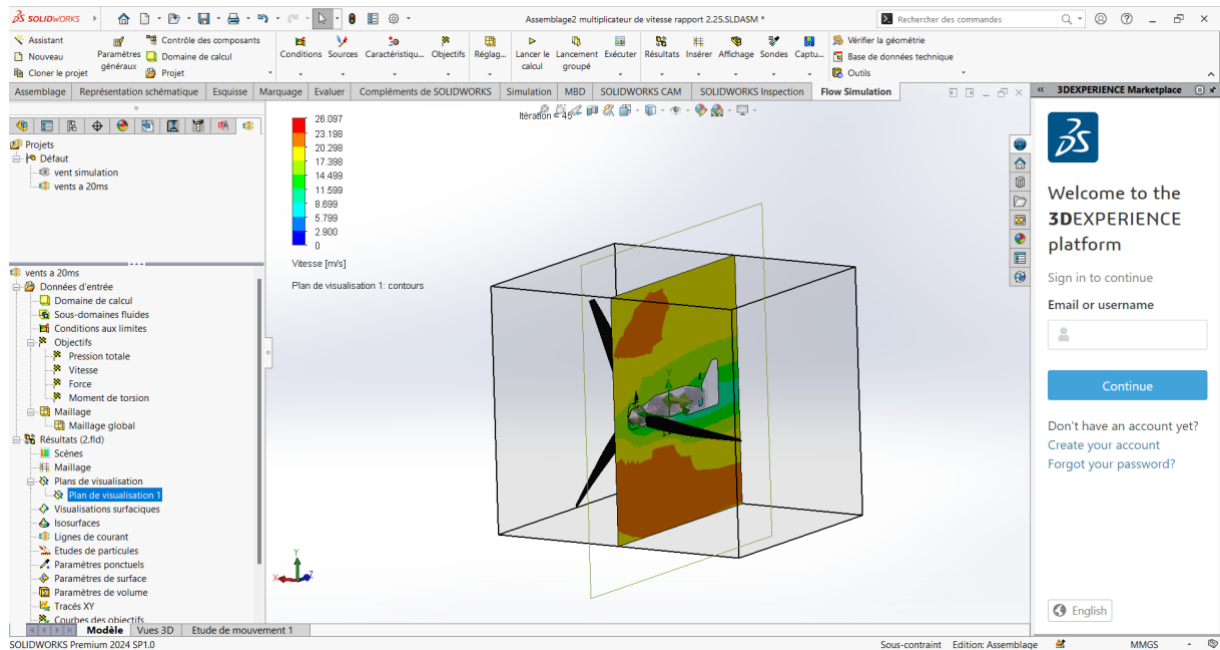


Figure IV.7 Champ de vitesse

- **Distribution de la pression sur les pales** (Figure 78) : la pression est maximale sur l'avant des pales et minimale à l'arrière, générant ainsi la portance nécessaire.

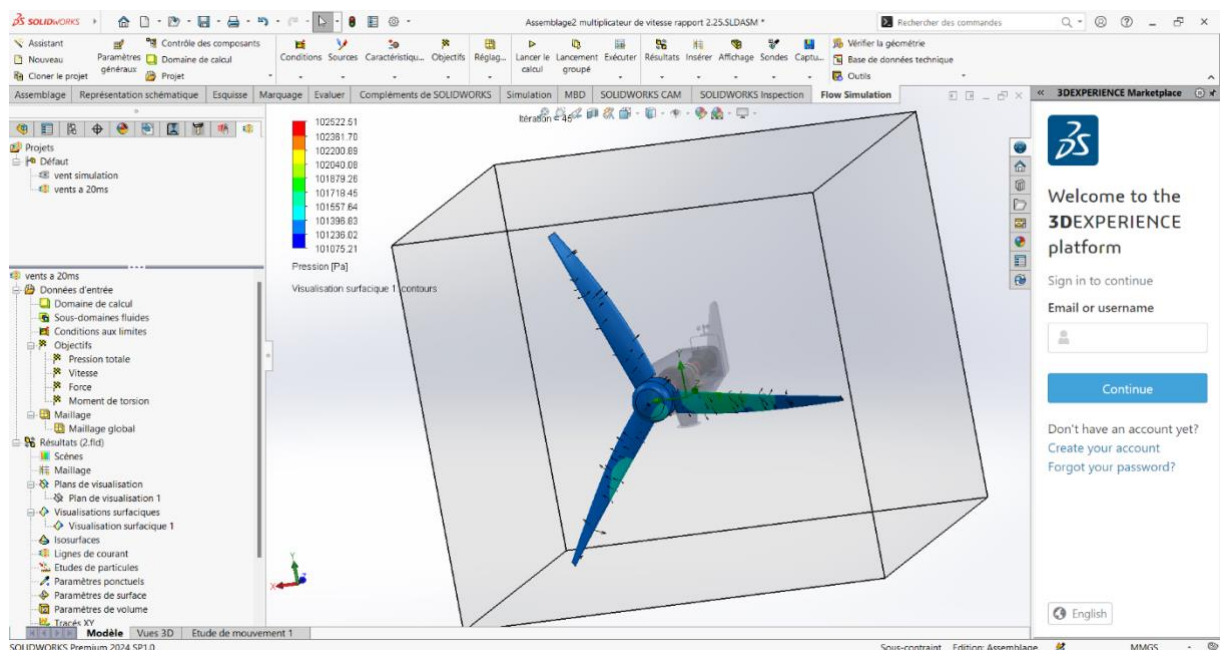


Figure IV.8 Distribution de la pression

- **Indication des pressions min/max (Figure 79) :** la pression varie entre environ 101182 Pa et 101750 Pa.

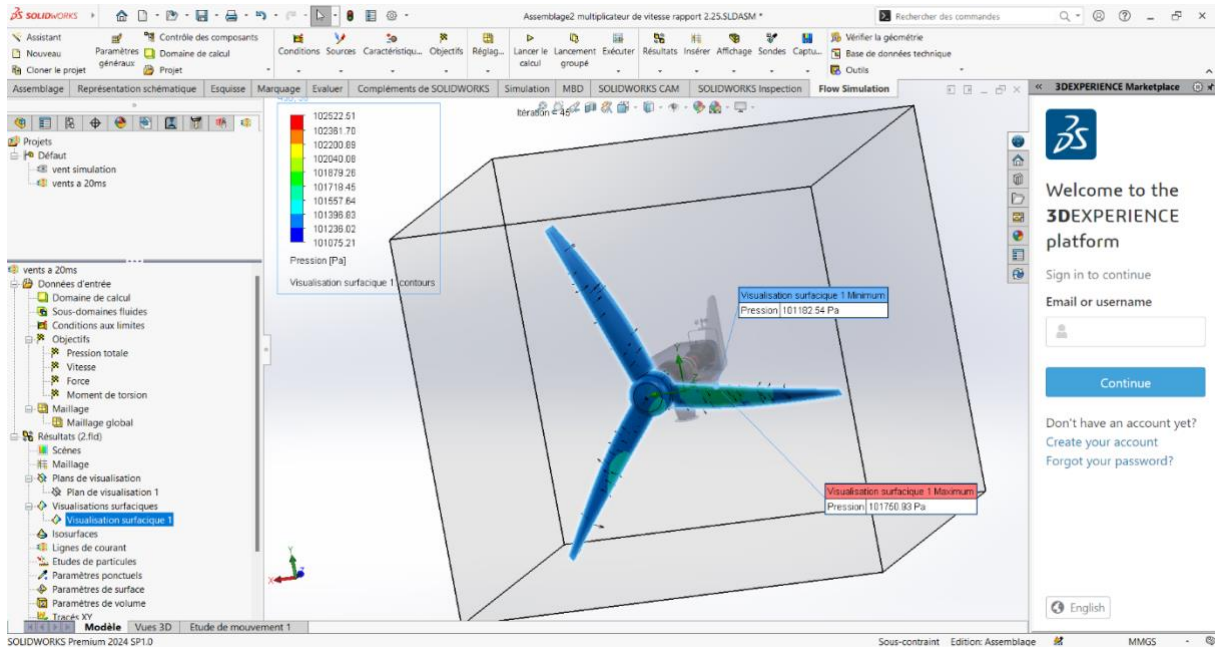


Figure IV.9 Indication des pressions min/max

- **Lignes de courant (Figure 80) :** elles illustrent la trajectoire de l'air à travers l'éolienne, confirmant une bonne pénétration du flux d'air.

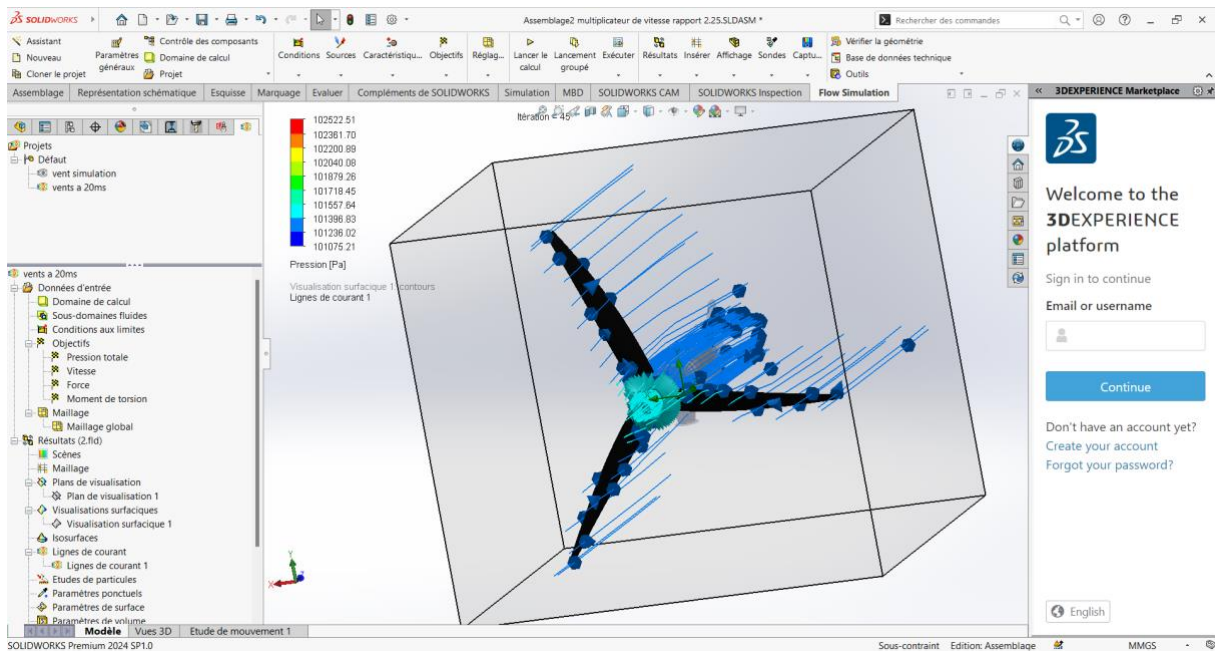


Figure IV.10 Lignes de courant

- Forces et moments (Figure 81) :
  - Force moyenne générée : environ **288 N**
  - Moment de torsion moyen : **-78 N.m**
  - Vitesse moyenne observée dans le domaine : **19,9 m/s**

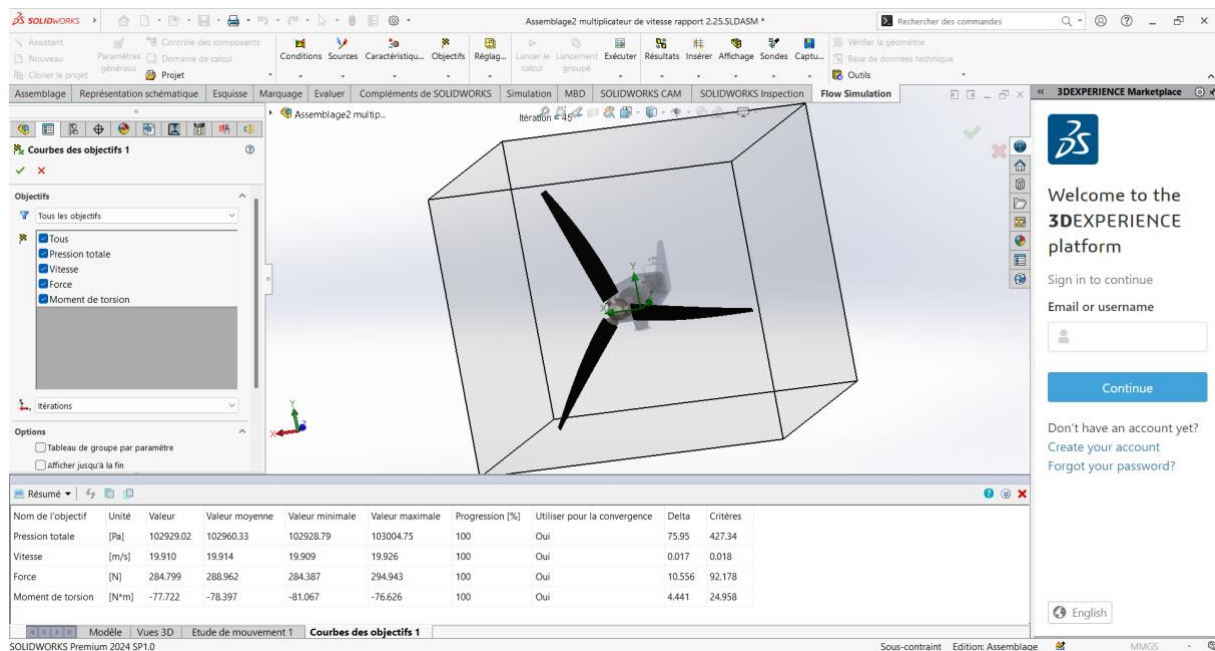


Figure IV.11 Forces et moments

## 6. Conclusion et comparaison avec les résultats théoriques :

Les simulations numériques réalisées sur SolidWorks ont permis de valider la conception mécanique et aérodynamique de l'éolienne.

La simulation structurelle des pales a confirmé leur bon comportement sous l'effet du vent, avec des contraintes et déformations bien inférieures aux limites admissibles du matériau en fibre de carbone Hexcel AS4C.

Enfin, l'analyse du multiplicateur planétaire dans SolidWorks Motion a confirmé un rapport de transmission de 2,25, avec une vitesse de sortie conforme aux exigences de la génératrice ( $\approx 1500$  tr/min).

Ces résultats confirment la cohérence entre les calculs théoriques et les performances simulées, assurant la fiabilité de l'éolienne conçue.

---

# Conclusion générale

---

Ce mémoire a porté sur la conception mécanique d'une éolienne domestique à axe horizontal, d'une puissance nominale de 5 kW, dans une optique de contribution aux solutions énergétiques durables adaptées aux besoins locaux. En s'appuyant sur une méthodologie rigoureuse combinant dimensionnements analytiques, modélisation sur SolidWorks, simulations numériques et sélection raisonnée des matériaux ce travail a permis de valider la faisabilité d'un système compact, robuste et fonctionnel.

L'ensemble des calculs effectués, notamment pour les arbres, le multiplicateur planétaire, les efforts transmis et les vérifications mécaniques, ont démontré que la conception retenue respecte les exigences de résistance, de fiabilité et de sécurité. De plus, les différentes simulations numériques (structurelle, cinématique, et aéraulique) ont confirmé les performances attendues de l'éolienne dans des conditions réelles d'exploitation.

Au-delà des résultats purement techniques, ce projet souligne l'importance de l'ingénierie intégrée dans le développement de solutions durables et accessibles. Il montre comment des choix optimisés, basés sur l'analyse mécanique et énergétique, peuvent contribuer à une meilleure autonomie énergétique, notamment pour les zones rurales ou isolées.

En perspective, ce travail ouvre la voie à de nombreuses améliorations futures telles que l'optimisation aérodynamique des pales à l'aide de la simulation CFD, l'intégration de systèmes de régulation intelligents adaptant la production à la demande, l'ajout de capteurs pour une maintenance prédictive, l'étude de configurations modulaires ou pliables ou autres facilitant le transport et l'installation, l'hybridation, ou encore l'adaptation du concept à des applications spécifiques telles que l'irrigation agricole ou l'électrification de sites isolés. Ce travail rappelle enfin que la transition énergétique repose aussi sur l'innovation technique à petite échelle, en lien avec les enjeux écologiques et sociétaux globaux.

### ➤ Références :

#### BIBLIOGRAPHIE:

- [7] P. Gipe, “Wind Energy Basics: A Guide to Home- and Community-Scale Wind Energy Systems”, 2nd edition, Chelsea Green Publishing, 2009.
- [10] Burton, Sharpe, Jenkins, Bossanyi, “Wind Energy Handbook”, 2nd edition, Wiley, 2011.
- [28] R. Gasch & J. Twele, “Wind Power Plants: Fundamentals, Design, Construction and Operation”, 2nd edition, Springer, 2012.
- [50] G. M. Maitra, “Handbook of Gear Design”, Tata McGraw-Hill, 2004.
- [51] R. C. Juvinall and K. M. Marshek, “Fundamentals of Machine Component Design”, 5th edition, Wiley, 2012.
- [52] R. G. Budynas and J. K. Nisbett, “Shigley’s Mechanical Engineering Design”, 10th edition, McGraw-Hill Education, 2015.
- [53] G. Müller, “Epicyclic Drive Trains: Analysis, Synthesis, and Applications”, Springer, 2007.
- [54] E. Hau, “Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics”, 2nd edition, Springer, 2013.

#### WEBOGRAPHIE:

- [1] <https://www.programme-energetique.fr/les-avantages-de-l-energie-eolienne-pour-l-environnement/>
- [2] <https://inspirefrance.fr/limpact-de-la-crise-petroliere-de-1973-sur-linnovation-energetique>
- [3] <https://fdmf.fr/le-mot-et-la-machine-eolienne/>
- [4] <https://www.programme-energetique.fr/les-avantages-de-l-energie-eolienne-pour-l-environnement/>
- [5] <https://www.lenergiétoutcompris.fr/travaux-renovation-energetique/produire-son-energie/eolien/comment-choisir>
- [6] <https://www.algerie-eco.com/2024/12/25/algerie-projet-a-letude-pour-produire-1-000-megawatts-denergie-eolienne>
- [8] <https://gwec.net/>
- [9] <https://www.nrel.gov/>
- [11] <https://www.sirenergies.com/article/histoire-energie-eolienne/>
- [12] <https://www.energy.gov/>
- [13] <https://www.siemensgamesa.com/global/en/home.html>
- [14] <https://www.iea.org/>
- [15] <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/energie-eolienne>
- [16] <https://www.sirenergies.com/article/fonctionnement-eoliennes>
- [17] <https://www.sirenergies.com/article/avantages-inconvenients-eoliennes>
- [18] <https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/innovation-ressources/energies-renouvelables/eolien>
- [19] <https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/transition-energetique>
- [20] <https://www.sirenergies.com/article/energie-eolienne-principes-et-fonctionnement/>
- [21] <https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/>
- [22] <https://www.eoliennesenmer.fr/>
- [23] <https://www.skf.com/africa/fr/industries/wind-energy>
- [26] <https://www.wind-energy-the-facts.org/>
- [27] <https://www.nrel.gov/>

## Référence

---

- [33] <https://www.nrel.gov/docs/fy03osti/34343.pdf>
- [34] <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/energie-eolienne>
- [35] <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/production-denergie-dans-le-monde>
- [36] <https://suisse-eole.ch/fr/news/energie-eolienne-developpement-record-de-117-gw-en-2023-la-barre-des-1-tw-de-puissance-eolienne-depassee/>
- [37] <https://www.aps.dz/algerie/161408>
- [38] <https://www.algerie-eco.com/2024/12/25/algerie-projet-a-letude-pour-produire-1-000-megawatts-denergie-eolienne/>
- [39] <https://www.aps.dz/economie/180734-energies-renouvelables-appel-a-investir-dans-diverses-ressources-notamment-l-energie-eolienne>
- [40] <https://lalgerieaujourd'hui.dz/nouvel-axe-de-developpement-des-energies-renouvelables-leolien-representera-23-en-2030/>
- [41] <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/industrie-eolienne>
- [42] <https://www.energy.gov.dz/?rubrique=energies-nouvelles-renouvelables-et-maitrise-de-lrenergie>
- [43] [https://www.ilboursa.com/marches/lalgerie-pays-africain-disposant-du-plus-grand-potentiel-eolien-terrestre-du-continent\\_24467](https://www.ilboursa.com/marches/lalgerie-pays-africain-disposant-du-plus-grand-potentiel-eolien-terrestre-du-continent_24467)
- [44] [https://www.lookpolymers.com/polymer\\_Cytec-Thornel-Mat-VMA-Carbon-Fiber.php](https://www.lookpolymers.com/polymer_Cytec-Thornel-Mat-VMA-Carbon-Fiber.php)
- [45] <https://xometry.pro/wp-content/uploads/2023/09/Steel-1.7131.pdf>
- [46] <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6772>
- [47] <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=9145>
- [48] <https://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=863>
- [49] [https://www.steelnumber.com/en/steel\\_composition\\_eu.php?name\\_id=18](https://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=18)

### ➤ Référence des figures :

- (1) <https://www.timetoast.com/timelines/histoire-de-l-eolienne>
- (2) <https://factuel.afp.com/doc.afp.com.34WG378>
- (3) <https://www.heliciel.com/helice/eolienne%20hydrolienne/Composants%20eolienne.htm>
- (4) [https://sti.eduscol.education.fr/ressources\\_techniques/inrs-brochure-ed-6346](https://sti.eduscol.education.fr/ressources_techniques/inrs-brochure-ed-6346)
- (5) [https://www.researchgate.net/figure/Schema-de-la-commande-multivariable-de-leolienne-CART\\_fig16\\_30514803](https://www.researchgate.net/figure/Schema-de-la-commande-multivariable-de-leolienne-CART_fig16_30514803)
- (6) <https://eol-dne.webnode.fr/partie-i/>
- (7) <https://blogeconomiecirculaire.wordpress.com/2018/07/10/le-petit-eolien-en-zone-urbaine-vraie-alternative-ou-fausse-bonne-idee/>
- (8) <https://www.diwatt.fr/eolienne-verticale.php>
- (9) <http://88.125.120.25:49280/act/itec/003/index.html?Introduction.html>
- (10) <https://www.eolienne-domestique.org/eolienne-savonius/>
- (11) <https://patentscope.wipo.int/search/fr/detail.jsf?docId=WO2017156536>
- (12) <https://www.bretagne-energie.fr/actualites/les-inconvenients-des-eoliennes-en-mer/>
- (13) <https://ecoliennes.weebly.com/son-utilisation.html>
- (14) <https://www.cder.dz/spip.php?article3568>
- (15) <https://www.sirenergies.com/article/energie-eolienne-principes-et-fonctionnement/>
- (16) <https://energieplus-lesite.be/techniques/eolien6/eoliennes/>
- (17) [https://grvtsp.fr/tpe/eol\\_prpc.html](https://grvtsp.fr/tpe/eol_prpc.html)

**REMARQUE** : Ces références ont été consulté entre la date du **08/02/2025** et **12/03/2025**.

## Résumé

Ce travail porte sur la conception et l'optimisation de la partie mécanique d'une éolienne domestique à axe horizontal d'une puissance nominale de 5 kW. Le projet a consisté à dimensionner mécaniquement les composants essentiels de l'éolienne tels que le rotor, les arbres de transmission, le multiplicateur de vitesse planétaire et le système de freinage, en tenant compte des efforts transmis, des contraintes mécaniques (torsion, flexion) et des coefficients de sécurité.

Une modélisation complète en 3D a été réalisée sur SolidWorks pour chaque composant, avec un choix rigoureux des matériaux basé sur leurs propriétés mécaniques. Des simulations numériques avancées ont été menées pour évaluer la résistance, la déformation et le comportement sous charge des pales, ainsi que le fonctionnement du multiplicateur de vitesse et l'écoulement du vent sur le rotor. Les résultats obtenus ont validé la cohérence des choix de conception et la fiabilité mécanique du système proposé.

## Abstract

This work focuses on the design and optimization of the mechanical components of a 5 kW horizontal-axis domestic wind turbine. The project involved the mechanical sizing of key elements such as the rotor, transmission shafts, planetary gear speed increaser, and braking system, considering transmitted loads, mechanical stresses (torsion, bending), and safety factors.

A complete 3D modeling was carried out using SolidWorks for each component, with a rigorous material selection based on mechanical properties. Advanced numerical simulations were conducted to evaluate the strength, deformation, and load behavior of the blades, as well as the operation of the gear system and airflow over the rotor. The results confirmed the consistency of the design choices and the mechanical reliability of the proposed system.

## الملخص

يركز هذا العمل على تصميم وتحسين المكونات الميكانيكية لتوربين رياح منزلي أفقي المحور بقدرة اسمية تبلغ 5 كيلوواط. تمثلت المهمة في حساب أبعاد العناصر الأساسية مثل الدوّار، محاور النقل، مضاعف السرعة الكوكبي، ونظام الفرملة، مع الأخذ بعين الاعتبار القوى المنقولة، والإجهادات الميكانيكية (اللي، الانحناء)، ومعاملات الأمان.

تم تنفيذ نمذجة ثلاثية الأبعاد كاملة لجميع المكونات باستخدام برنامج SolidWorks، مع اختيار دقيق للمواد بناءً على خصائصها الميكانيكية. كما تم إجراء محاكاة رقمية متقدمة لتقييم المقاومة، والتشوه، وسلوك التحميل لشفرات التوربين، بالإضافة إلى تحليل أداء نظام النقل الهوائي وسير حركة الرياح على الدوّار. وقد أكدت النتائج صحة اختيارات التصميم وموثوقية الأداء الميكانيكي للنظام المقترح.