
Rapport PIE de mi-parcours

Challenge Onera 2025

Optimisation d'un rotor
en aérodynamique et aéroacoustique

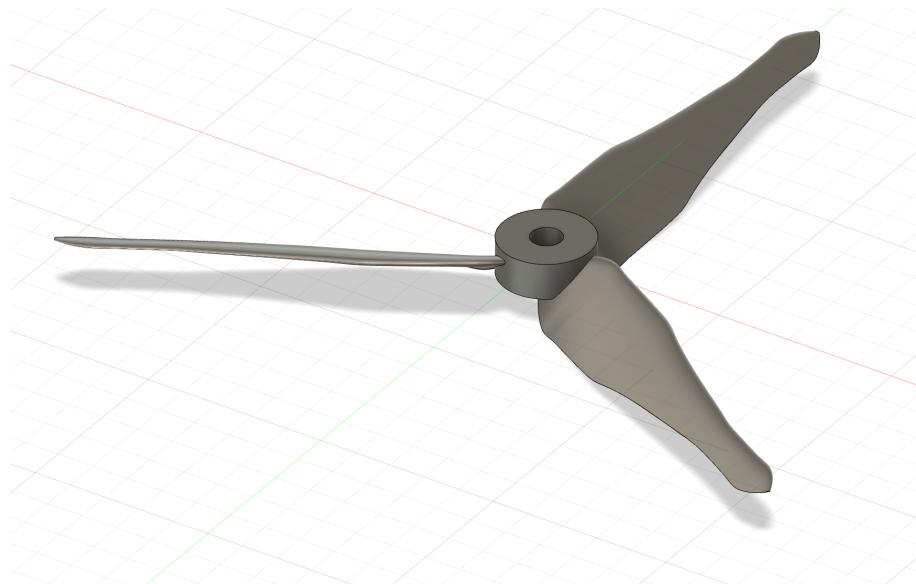


Table des matières

1 Le cadre du projet	4
1.1 Enjeux	4
1.2 Objectifs	5
1.3 Périmètre	5
2 Structure du projet	7
2.1 Équipe projet	7
2.2 Parties prenantes	8
2.3 Ressources et difficultés	9
3 Organisation du projet	11
3.1 Analyse et structuration	11
3.2 Planification	11
3.3 Maitrise des risques	12
4 Point d'étape	13
4.1 Pôle Calcul & Optimisation	13
4.2 Pôle CFD & Simulation	14
4.3 Pôle Impression & Expérimentations	15
5 Annexes : Modélisations mécaniques	17

Introduction

Dans le cadre de la formation d'ingénieur·e·s généralistes, ENSTA Paris intègre à son cursus de 2ème année un Projet d'Ingénieur en Equipe. Appelés PIE, ces divers projets par équipe d'environ 8 étudiants, ont pour principal objectif de développer des compétences essentielles à l'ingénieur. Travail en équipe, prise de décision, autonomie, application de contenu théorique, management, et responsabilisation sociale et environnementale sont autant de compétences visées par ces PIE.

Parmis les équipes de l'année 2024, se tient la notre. Son projet est directement repris de l'année 2023 où une équipe avait travaillé sur le challenge donné par l'Onera. En compétition avec d'autres équipes d'autres écoles, notre objectif est la réalisation d'un rotor aérien devant trouver le meilleur design alliant une consommation minimale en énergie et une puissance acoustique réduite.

Vous trouverez dans le présent rapport, un état des lieux du début du projet.

Rédacteurs

Thomas Lefert	2ème année ENSTA Paris	Majeure Mécanique
Léo Vallat	2ème année ENSTA Paris	Majeure Mécanique
Guillaume Le Bronnec	2ème année ENSTA Paris	Majeure Mécanique
Mathis Idda	2ème année ENSTA Paris	Majeure Mécanique
Alexandre Laleu	2ème année ENSTA Paris	Majeure Mécanique
Cleiton Angonese	2ème année ENSTA Paris	Majeure Mécanique
Guillemette Flichy	2ème année ENSTA Paris	Majeure Mécanique
Nathan Smadja	2ème année ENSTA Paris	Majeure Maths App
Romain Vincent	2ème année ENSTA Paris	Majeure Mécanique

1. Le cadre du projet

1.1. Enjeux

Cette année, l’Onera a choisi de reprendre le même sujet que celui de l’an dernier pour son challenge scientifique, à savoir : une hélice optimisée en puissance et en son. L’enjeux de cette entreprise en équipe est triple :

1^{er}) Gagner au moins un des 6 aspects de l’évaluation du Challenge Onera

Les 5 aspects récompensés l’année dernière étaient les suivants :

- Le meilleur compromis traction/émission acoustique (gagné par ENSTA Paris)
- Le rotor le plus discret acoustiquement (gagné par ELISA Aerospace)
- Le rotor offrant la consommation électrique minimale (gagné par Polytechnique)
- La meilleure démarche scientifique (gagné par ENSTA Paris)
- La meilleure présentation des travaux (gagné par ENSTA Paris)

L’ambition de notre équipe cette année est de maintenir les 3 prix sur les 5 critères d’évaluation

2^{ème}) Mettre en oeuvre une démarche projet responsable et alignée aux valeurs d’ENSTA Paris

Ce projet étant réalisé dans le cadre de la formation ingénieur de l’ENSTA, le deuxième objectif recoupe également un effort d’harmonisation. La devise de l’école recoupant les points majeurs de sa politique, notre PIE se devra de contribuer à *une ingénierie fondée sur l’excellence scientifique* s’appuyant sur le *numérique pour accompagner les transformations des grands secteurs stratégiques* et ainsi répondre aux *attentes fondamentales de la société*.

En pratique dans notre projet, notre travail ne devra pas perdre de vue l’exploitation de notre formation académique, notamment en mécanique des fluides. Il devra mobiliser des outils numériques pour produire un rotor moins consommateur en énergie, qui, à son échelle, contribura pour le domaine de l’aéronautique, à un effort national de sobriété, dans le cadre du respect des accords de Paris.

3^{ème}) Concrétiser une formation théorique et acquérir de nouvelles compétences non académiques

Parce qu’un tel projet requiert une autonomie importante de ses membres, chacun devra apprendre à prendre des initiatives, à proposer des solutions et des idées, à col-

laborer avec d'autres étudiants qu'il ou elle ne cotoierait pas autrement et à organiser ses tâches pour contribuer efficacement à l'oeuvre commune.

1.2. Objectifs

Les résultats du classement de l'Onera se basent sur le graphe normalisé suivant :

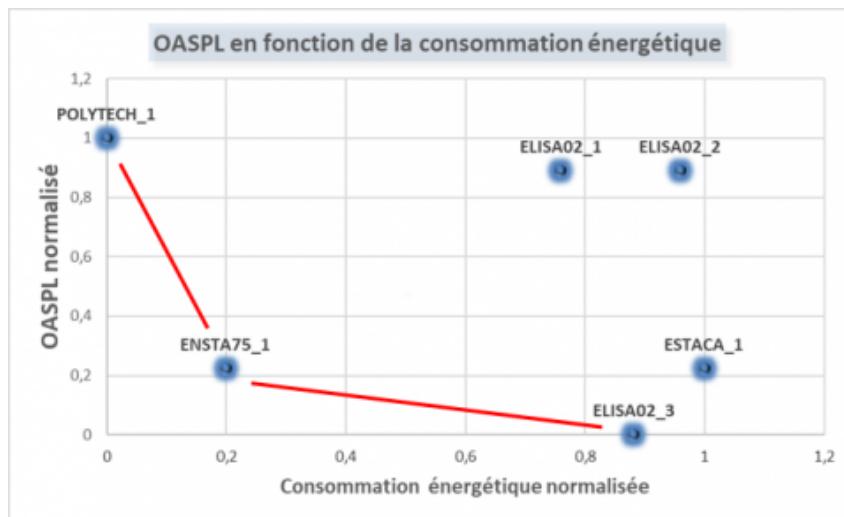


FIGURE 1.1 – Front de Pareto selon la consommation énergétique (en abscisse) et le bruit rayonné (en ordonnée)

Afin de s'approcher au plus des attendus de l'Onera, nous mettrons en place une démarche d'évaluation des hélices que nous produirons en les positionnant sur un tel graphe. L'objectif sera donc : réduire au plus la distance Euclidienne au point (0,0) du rotor que nous proposerons au challenge.

Si cet objectif est vérifié, il permettra de maintenir à l'équipe ENSTA, le prix du meilleur compromis. Avec un effort suffisant de pédagogie et de clareté dans notre démarche nous pourrons également maintenir les deux autres prix gagnés en 2024.

La production d'un rapport détaillé de l'impact carbone d'un tel rotor, permettra de vérifier l'enjeu lié à la philosophie d'ENSTA paris.

Enfin, l'ensemble de cette démarche permettra de répondre à l'enjeu de formation des étudiants de notre équipe.

1.3. Périmètre

La constitution de l'équipe PIE fut réalisée le 17 Octobre 2024. Le début effectif de son travail ne put cependant commencer que le 25 du même mois. Le rendu de l'hélice pour le challenge se fera le lundi 10 Février 2025. La fin du projet à l'ENSTA sera concrétisé par le rendu d'un rapport final mi-Mai 2025. Le présent rapport de mi-parcours est rendu le 17 Janvier 2025.

Pour la réalisation du projet, l'équipe a accès aux ressources du laboratoire mécanique d'ENSTA Paris ainsi qu'au Fab Lab de l'école Polytechnique grâce à IP Paris. La majorité des réunions d'équipe se déroulent dans la salle de réunion du bâtiment de mécanique et le dispositif expérimental est également établi dans ce même bâtiment.

Le temps accordé des membres pour le projet étant limité au milieu d'un emploi du temps déjà chargé, il est primordial de se fixer des objectifs qui ne sont pas trop ambitieux. Aussi, ce projet étant le premier vrai projet scientifique des membres, il est à garder à l'esprit que ne pourra être rendu un livrable très complexe. Nous devrons miser sur des outils et solutions simples mais efficaces pour parvenir à nos objectifs.

2. Structure du projet

2.1. Équipe projet

La constitution de l'équipe projet sur le premier semestre est la suivante.

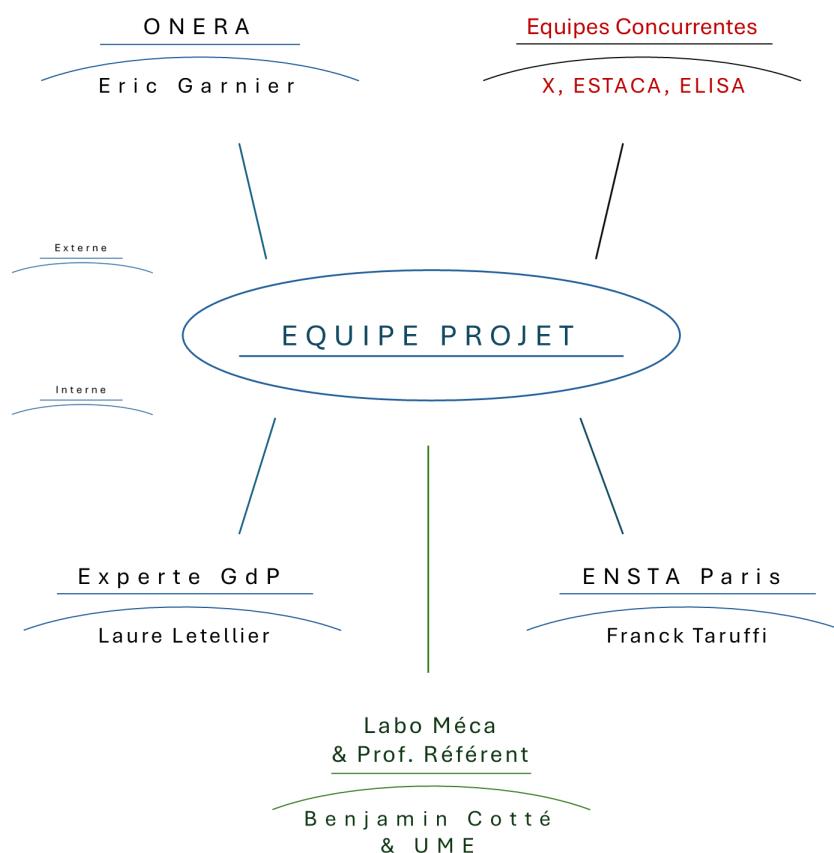


Chaque membre est étudiant en 2ème année du cycle ingénieur d'ENSTA Paris. Au deuxième semestre de l'année, 4 membres de l'équipe seront contraints de partir. Il s'agira de réorganiser le travail pour continuer à avancer sur le rotor.

Chaque membre du projet est associé à une responsabilité particulière. Pour autant, toute l'équipe est amenée à travailler sur plusieurs tâches en fonction de ses disponibilités.

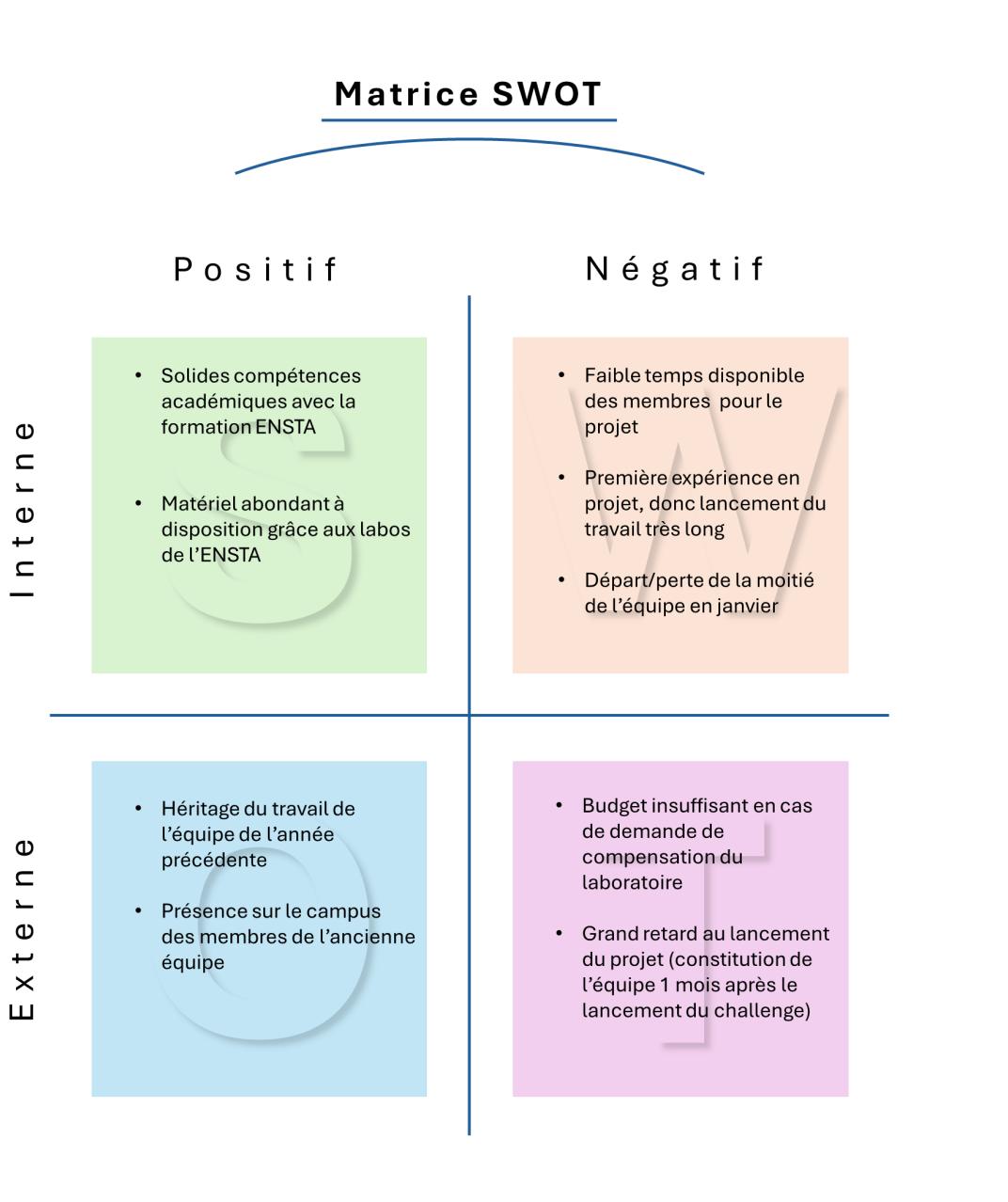
2.2. Parties prenantes

Autour de l'équipe projet gravitent principalement deux familles d'acteurs externes et trois familles d'acteurs internes.



2.3. Ressources et difficultés

La matrice SWOT ci-dessous, regroupe les éléments-clés de l'analyse du cadre du projet.



• **Strengths :**

Grâce à notre formation d'ingénieur et à l'infrastructure de l'école, nous avons les moyens physiques et intellectuels pour mener à bien ce projet.

• **Weakness :**

La plus grande faiblesse de l'équipe sera le manque de temps. Les créneaux réservés ne suffisant pas et se trouvant majoritairement après la date d'envoi du rotor, le temps jouera contre nous. Il est également difficile d'appréhender la perte de presque la moitié de l'équipe projet en janvier.

• Opportunities :

Ce challenge ayant été reconduit sur la base de celui de l'an dernier, nous pouvons nous faire aider de nos camarades de 3ème année encore sur le campus.

• Threats :

Le temps jouant encore contre nous, nous avons pris un immense retard dû à la constitution tardive de l'équipe.

3. Organisation du projet

3.1. Analyse et structuration

Le cahier des charges ci-dessous regroupe les points mentionnés dans la consigne du challenge Onera

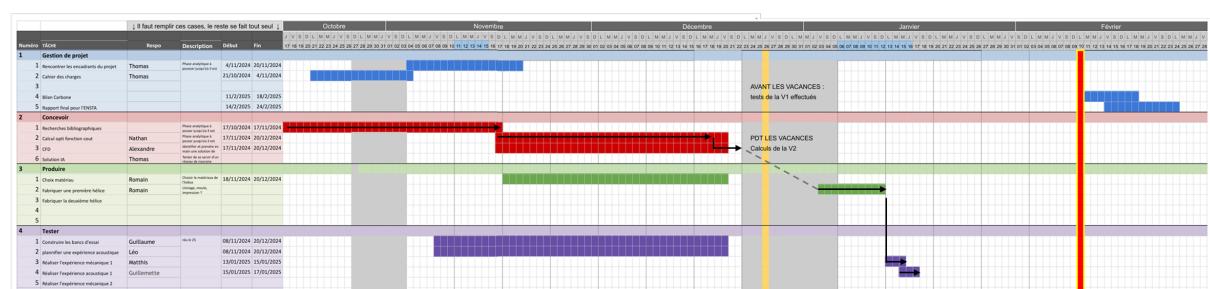
Exigences				Marge de Liberté
Niveau 0	Niveau 1	Niveau 2	Détail	
0. Rotor aérien	1. Permettre 4,0N de poussée en minimisant la consommation électrique	1.1. Diamètre du rotor d < 22cm 1.2. Viterre de rotation f < 9 000 tr/min	Par symétrie et avec une marge d'erreur, nous fixerons une pâle de 9 cm Les tests seront effectués avec un maximum de 8500 tr/min	Forme de la pale Vitesse de rotation pour viser exactement les 4,0N, ni plus ni moins
	2. Minimiser les fluctuations de pression dans [20-1000]Hz	2.1. Choisir un design sur le front de Pareto du graphe son/consommation		
	5. Compatibilité du rotor au moteur de l'Onera	5.1 Fixation du rotor avec une tige filetée de 8mm	Utilisation du même moteur que celui de l'Onera, ce qui inclue la fixation	Nombre de pales
	4. Budget limité	4.1 Utilisation du matériel à disposition dans le laboratoire de mécanique	200€ provenant d'ENSTA Paris, budget des PIE	Aucune obligation de dépense et majorité des besoins assurés par le laboratoire

La validité des différents critères sera contrôlée au cours du développement de notre hélice.

Pour ce qui est du budget, les éventuelles dépenses en matériel sont indirectement prises en charge par l'UME. En contrepartie, le budget servira dans un premier temps à acheter un tachymètre qui nous permettra de mesurer la vitesse de rotation du rotor. L'autre moitié restante n'a pour l'instant pas vocation à être utilisée.

3.2. Planification

Une première planification du travail est décrite sur le diagramme de GANTT suivant.



La première étape du projet est l'établissement d'une bibliographie (sur l'aérodynamique et l'aéroacoustique). Cinq travaux ont ensuite pu être menés en parallèle : Le travail sur le code d'optimisation, celui sur le logiciel de CFD, celui sur la préparation de l'impression de l'hélice, et ceux sur la préparation des tests mécaniques et acoustiques.

Comme l'indique la flèche du chemin critique, une fois le code prêt, différentes propositions de formes de pales seront simulées. L'une d'entre elles sera choisie, imprimée et testée mécaniquement et acoustiquement.

La première phase sera ainsi cloturée et dans l'idéal, nous pourrons répéter ce protocole une deuxième fois afin d'améliorer des performances ciblées du rotor.

3.3. Maitrise des risques

Voici les principaux risques identifiés et ordonnés par produit de Gravité-Probabilité décroissant.

Risque	Gravité /5	Probabilité /5	Risque	Produit
Manque de temps de l'équipe pour se consacrer au projet	5	5	Manque de temps de l'équipe pour se consacrer	25
Casse du moteur ou du rotor pendant un test	5	2	Capteur d'effort inutilisable	15
Non aboutissement des calculs	3	3	Casse du moteur ou du rotor pendant un test	10
Non aboutissement des améliorations du code	3	3	Envoi en retard du livrable	10
Non aboutissement des simulations CFD	2	1	Non aboutissement des calculs	9
Non aboutissement des tests acoustiques	2	2	Non aboutissement des améliorations du code	9
Non aboutissement des tests énergétiques	2	3	Non aboutissement des tests énergétiques	6
Capteur d'effort inutilisable	5	3	Non aboutissement des tests acoustiques	4
Envoi en retard du livrable	5	2	Non aboutissement des simulations CFD	2

Le premier risque dans ces 9 principaux est celui mentionné plus haut : le temps. Le manque de temps à consacrer au projet est en premier lieu une faiblesse du projet, mais rapidement, il peut se transformer en un risque de non aboutissement du projet. En plus d'être d'une gravité maximale, la probabilité est elle aussi importante.

Le second risque dans l'ordre d'importance touche au capteur d'effort. Une exigence du challenge Onera est de produire une hélice développant une poussée de 4,0 Newtons à moins de 9 000 tours par minute. Pour connaître cette poussée, l'utilisation d'un capteur de force est primordiale. Sa probabilité de panne est élevée car le capteur que nous avons, montre de forts des signes de dysfonctionnement.

4. Point d'étape

4.1. Pôle Calcul & Optimisation

Comme vu en section 3.2, le début du cheminement qui aboutira au rotor débute par un calcul d'optimisation d'une fonction de coût. L'équipe de l'année dernière avait basé son calcul sur une méthode de résolution 2D de portance sur chaque section élémentaire de pôle. C'est-à-dire que pour optimiser une forme d'hélice, ils partaient d'une forme aléatoire de pôle au NACA fixé, et optimisaient 2 paramètres sur chaque section élémentaire : la corde et le vrillage.

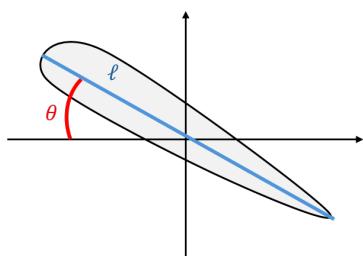


FIGURE 4.1 – Les deux paramètres à faire varier

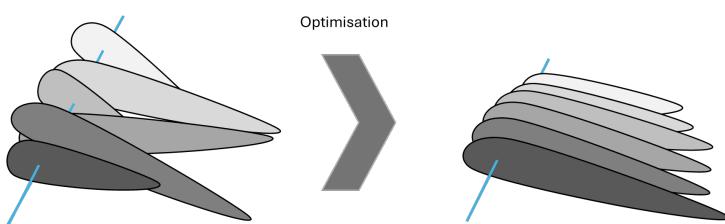


FIGURE 4.2 – Processus d'optimisation de l'aile

Nous comprenons désormais ce qui a été fait et allons améliorer en priorité trois points :

- **L'augmentation du nombre de paramètres à optimiser** en intégrant les 3 valeurs du profil NACA et d'autres paramètres au besoin.
- **L'utilisation de nouvelles équations aérodynamiques**, celles utilisées ne nous satisfaisant pas totalement.
- **Une tentative d'intégration d'un effet 3D**, pour considérer les flux d'airs transversaux.

Quoi qu'il en soit, la priorité de ce pôle devra être la production rapide de résultats. Etant en début de chaîne, les autres pôles dépendent fortement de ces résultats.

4.2. Pôle CFD & Simulation

L'objectif principal de ce pôle est de confirmer par la simulation CFD (Computational Fluid Dynamics) des résultats du pôle calcul et optimisation ou éventuellement commencer à fournir des pistes pour la recherche de paramètres optimum comme le NACA utilisé ou les RPM optimaux pour atteindre la portance cherchée.

Dans l'attente des premiers résultats du pôle calcul et optimisation, le gros du travail pendant cette première partie de projet résidait dans la familiarisation avec le logiciel DUST nous permettant de faire ces simulations.

Pour ce faire, nous avons commencé par l'étude d'une hélice de référence dont les calculs de portance et de moment avaient déjà été faits. L'objectif étant de retrouver ces mêmes résultats avec nos simulations. DUST fournit les portances et moments pour chaque section élémentaire de la pale en fonction du temps. Le traitement des données et les représentations graphiques ont été effectués sur python.

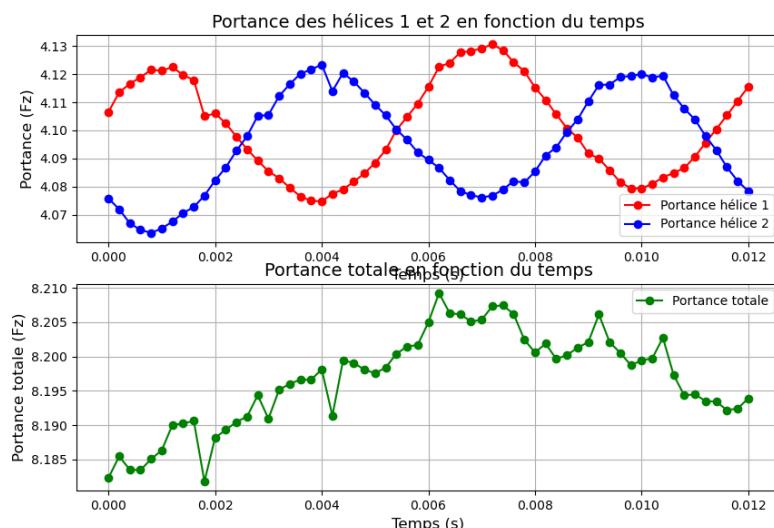


FIGURE 4.3 – Exemple de courbe de portance obtenue avec la simulation CFD

Par la suite, nous nous sommes attelés à la comparaison des résultats du code d'optimisation du projet 2024 pour 2 et 3 hélices :

2 pales - 9 segments									
corde	2,5	3,34	3,41	3,41	3,35	2,77	2,66	2,15	0,92
twist	45	34	29	23	18	16	14	13	12

3 pales - 9 segments									
corde	1,78	2,37	2,32	1,99	1,52	1,29	1,03	0,96	0,96
twist	31,5	29,6	27,3	24,7	21,7	20,2	18,3	18,3	18

3 pales - 15 segments														
corde	1,3805	2,3844	2,3896	2,3901	2,3852	2,3268	2,0071	1,7388	1,5234	1,3421	1,1753	0,9858	0,9608	0,9604
twist	27,1339	35,99	33,0447	30,2161	28,3164	26,5049	24,5488	22,6128	21,255	20,0277	19,0277	19,2054	18,2765	18,005

RPM = 4500

4 pales - 15 segments														
corde	1,3786	2,3288	2,3567	2,3368	2,399	2,395	1,8532	1,5522	1,3427	1,1654	1,0077	0,9841	0,9636	0,9621
twist	26,948	35,9371	35,5405	33,4427	30,5247	29,2961	25,7451	23,3183	22,1836	20,9668	19,7538	19,4007	19,8003	18,0233

RPM = 4000

FIGURE 4.4 – Paramètres optimisés du projet précédent

Nous avons cherché à comparer les performances, en termes de portance, entre l'hélice 2 pales (tableau 1) et l'hélice 3 pales (tableau 3) en cherchant le RPM minimal nous fournissant une portance de 4,5N pour chacune d'elles.

Ainsi, nous avons lancé trois simulations à des RPM différents pour chacune des hélices et interpolé les portances obtenues pour avoir une idée de la relation portance-RPM :

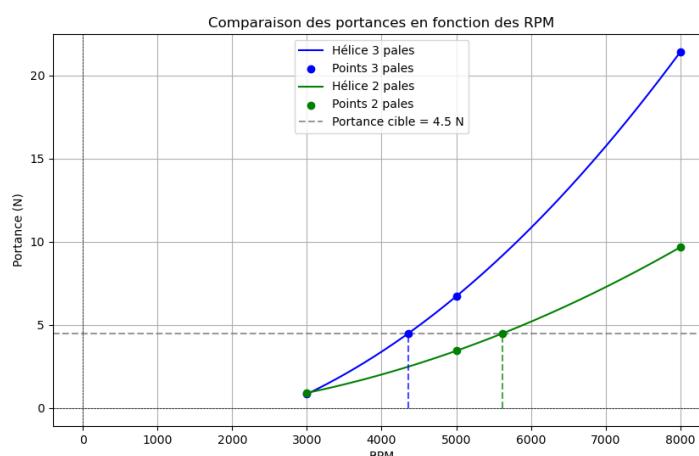


FIGURE 4.5 – Interpolation RPM-portance

Les résultats montrent, comme attendu, que l'hélice 3 pales est la plus performante et que la vitesse de rotation produisant 4,5 N doit se situer aux alentours de 4 400 RPM.

4.3. Pôle Impression & Expérimentations

Pour réaliser les expérimentations, nous récupérons les éléments du banc d'essai utilisé l'année dernière, dont le même moteur que celui utilisé à l'ONERA pour les tests finaux, un capteur de force et un capteur de couple. Une cage métallique est également utilisée pour la protection lorsque l'hélice est en rotation. Le moteur est contrôlé depuis un ordinateur grâce à une carte Arduino. Nous pouvons donc choisir la vitesse de rotation ainsi que la durée de fonctionnement du moteur.

Lorsqu'une hélice est en rotation, nous devons réaliser deux types de tests : les **tests de puissance** et les **tests sonores**. Pour les premiers, on relie les deux capteurs (force et couple) à un ordinateur et un logiciel traite les données.

Les détails du travail expérimental mécanique sont trouvables en Annexe.

Bilan

Le PIE répondant au Challenge Onera au nom de l'ENSTA est en bonne voie. Tous les travaux ont débutés et chaque pôle avance. L'équipe est motivée et compétente.

En revanche, le projet souffre d'un terrible manque de temps à y consacrer. Les délais particulièrement serrés ajoutent au retard qui s'accumule déjà, des suspicions quant à l'atteinte des exigeances fixées. Nous produirons dans toute éventualité, un rotor et ferons ce que nous pourrons pour que celui-ci permette à notre équipe de remporter certains aspects du challenge.

5. Annexes : Modélisations mécaniques

Pour tester notre hélice, nous avons besoin d'un capteur de force très précis afin de s'assurer qu'elle exerce bien une force de 4 N lorsque le moteur tourne. Nous avons donc repris le banc d'essai que l'équipe de l'année dernière avait construit et avec lequel ils ont fait leurs mesures. Il consiste en un capteur de couple et un capteur de force, montés l'un sur l'autre (voir figure 5.1). On vient ensuite fixer le moteur directement dessus, ce qui permet de mesurer le couple et la force qu'il exerce.



FIGURE 5.1 – Capteur de force (au-dessus) et capteur de couple (en-dessous)

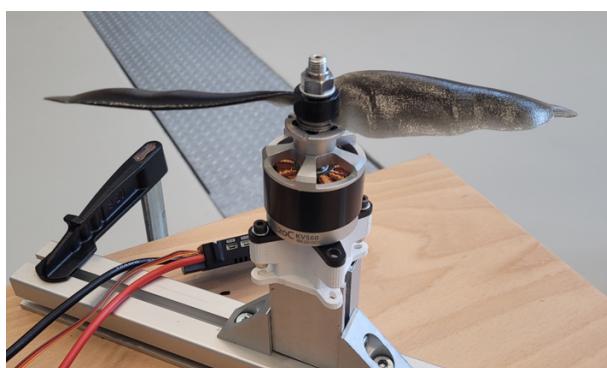


FIGURE 5.2 – Moteur et hélice sur le banc d'essai

Pour piloter notre moteur, nous avons utilisé une carte Arduino et son environnement de développement intégré (IDE) basé sur le langage C++. La bibliothèque « servo » est très utile pour cela. Initialement développée pour piloter les servomoteurs, elle peut également être utilisée pour contrôler des moteurs brushless (les moteurs utilisés pour les drones). Il suffit donc de brancher l'ESC du moteur à une broche 5V, à une broche PWM et à la masse de la carte Arduino (broche GND), puis de téléverser le code dans la carte à l'aide d'un câble USB pour pouvoir piloter le moteur. Dans

l'exemple de code donné en figure 5.3, il suffit d'appuyer sur la touche « a » du clavier de l'ordinateur pour que le moteur démarre et sur la touche « z » pour qu'il s'arrête. La commande Servo1.writeMicroseconds() permet d'indiquer au moteur à quelle vitesse tourner. Elle peut prendre en argument une valeur entre 1000 et 2000, 1000 étant l'arrêt du moteur et 2000 la vitesse maximum.

```

1  #include <Servo.h>
2
3  Servo Servo1;
4  const int servoPin = 5;
5
6  void setup() {
7      Serial.begin(9600); // Initialisation de la communication série
8      Servo1.attach(servoPin);
9      Servo1.writeMicroseconds(1000);
10     delay(1000); // Attacher le servomoteur à la broche définie
11 }
12
13 void loop() {
14     if (Serial.available() > 0) {
15         char command = Serial.read(); // Lire le caractère envoyé
16         if (command == 'a') {
17             Servo1.writeMicroseconds(1200); // Commande pour faire tourner le moteur à la vitesse souhaitée
18             Serial.println("Moteur en marche");
19             delay(3000);
20         } else if (command == 'z') {
21             Servo1.writeMicroseconds(1000); // Commande pour arrêter le moteur
22             Serial.println("Moteur arrêté");
23             delay(3000);
24         }
25     }
26 }
```

FIGURE 5.3 – Interpolation RPM-portance

Pour recevoir les données issues des capteurs de couple et de force, ceux-ci sont reliés respectivement aux canaux 1 et 2 d'un appareil appelé GSV-8DS qui lui-même est relié à une prise USB de l'ordinateur (voir figure 4.6)

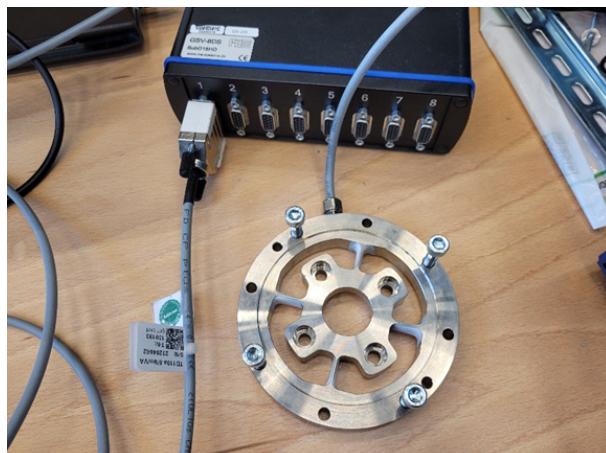


FIGURE 5.4 – GSV-8DS (en noir en haut) auquel est relié sur le canal 1 le capteur de couple

Nous avons ensuite utilisé un logiciel appelé GSVmulti qui nous permet d'observer en temps réel les valeurs mesurées par les capteurs. Ce logiciel permet également d'enregistrer les données afin de les traiter ultérieurement.

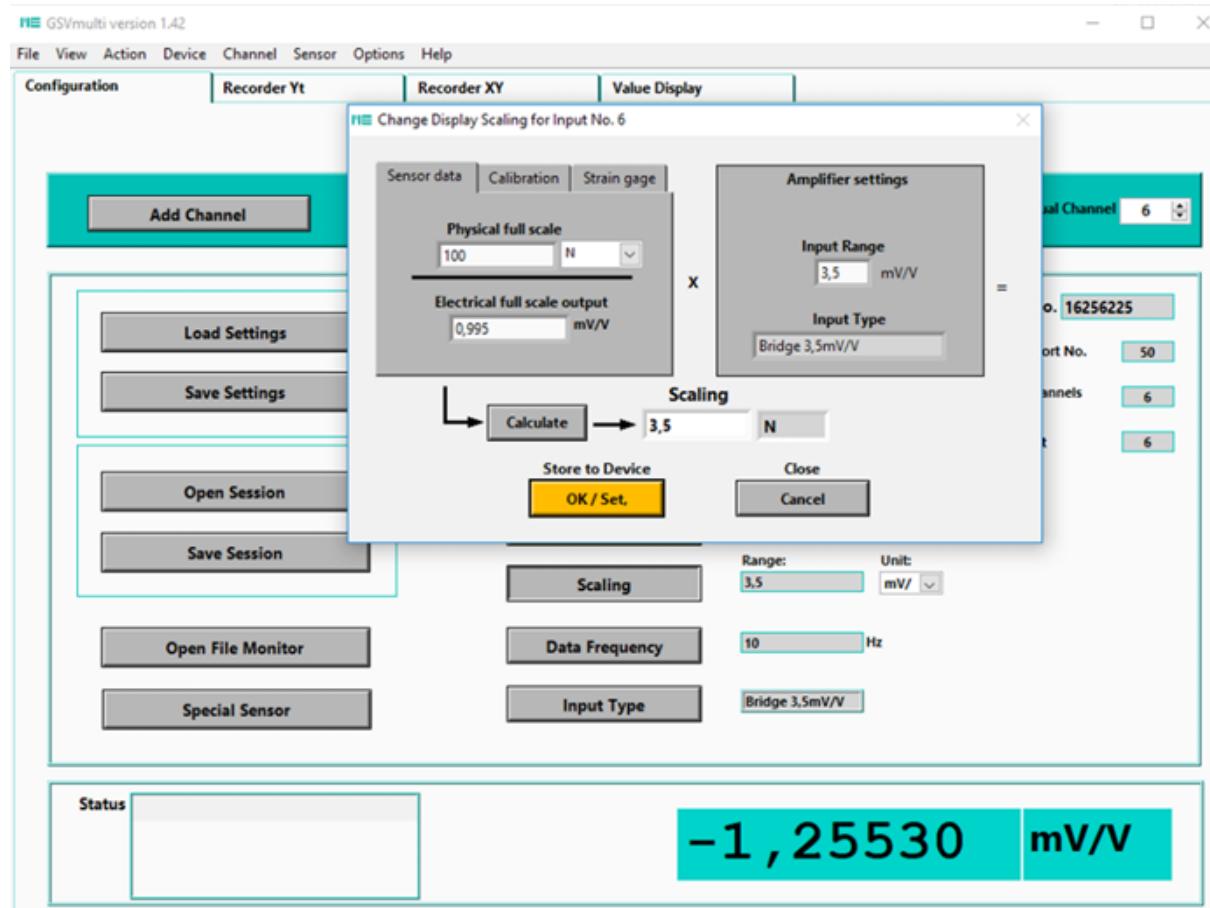


FIGURE 5.5 – Interface de GSVMulti, la mesure se lit en bas à gauche